

ВЕСТНИК

Воронежского государственного технического университета



- **РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**
- **МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**
- **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ**

**ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

ВЕСТНИК

**Воронежского государственного
технического университета**

Том 21 № 3 2025 г.

Основан в апреле 2000 г.

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» - 41891.

Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал выходит четыре раза в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор В.Р. Петренко, д-р техн. наук – Воронеж

Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов, д-р техн. наук – Воронеж

Ответственный секретарь С.А. Малоюкова – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

В.Н. Бурков – д-р техн. наук – Москва;
Д.А. Новиков – д-р техн. наук – Москва;
С. Лухан-Мора – проф. – Испания;
А.К. Погодаев – д-р техн. наук – Липецк;
А.Ф. Тузовский – д-р техн. наук – Москва;
С.Л. Подвальный – д-р техн. наук – Воронеж;
В.Л. Бурковский – д-р техн. наук – Воронеж;
В.В. Куц – д-р техн. наук – Курск;
А.Г. Ивахненко – д-р техн. наук – Курск;
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;
В.Ф. Селиванов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;
В.П. Пашинцев – д-р техн. наук – Ставрополь;
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза;
А.А. Гладких – д-р техн. наук – Ульяновск;
А.В. Башкиров – д-р техн. наук – Воронеж

Ответственность за подбор и изложение фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений несут авторы публикаций. Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке статей ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: 394026, Воронежская обл., г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, к. 211

Телефон: +7 (473) 278-38-89

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Адрес издателя: 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2025

12+

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration number PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

Founder: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Subscription index in the United catalog "Russian Press" - 41891.

The journal "Bulletin of Voronezh State Technical University" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published.

The journal is published four times a year

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief V.R. Petrenko, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh
Deputy Editor-in-Chief I.G. Drozdov, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

Executive secretary S.A. Malyukova – Voronezh

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

V.N. Burkov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
D.A. Novikov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
Sergio Lujan Mora – Professor – Spain;
A.K. Pogodaev – Dr. Sc. (Tech.) – Lipetsk;
A.F. Tuzovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
S.L. Podvalny – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.L. Burkovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.V. Kuts – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
A.G. Ivakhnenko – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;
V.F. Selivanov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.P. Pashintsev – Dr. Sc. (Tech.) – Stavropol;
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza;
A.A. Gladkikh – Dr. Sc. (Tech.) – Ulyanovsk;
A.V. Bashkirov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

The authors of publications are responsible for the selection and presentation of facts, quotations, statistics and other information. The articles coming to the editorial office are reviewed. The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors of the materials. When reprinting articles, the link to the journal is obligatory.

Address: 394026, Voronezh Oblast, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 211

Phone number: +7 (473) 278-38-89

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Publisher: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Publisher address: 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© Voronezh State Technical University, 2025

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Методика и технологии реализации системы подбора рекомендаций информационных ресурсов в IT-компаниях	
Е.Н. Королев	7
Математическое моделирование процессов теплообмена в ограждениях при пожаре в горной выработке	
И.Н. Пожаркова	15
Разработка алгоритма рейтингования для выбора предпочтительного экземпляра класса аналитической информационной системы	
Е.В. Колыхалова, Д.К. Проскурин	25
Алгоритм определения оптимального интервала влияния факторов в моделировании урожайности	
Я.М. Иванько, Е.С. Климов	29
Повышение точности прогнозирования временных рядов с использованием векторного временного кодирования и моделей машинного обучения	
С.Л. Подвальный, Н.В. Саввин, Д.Н. Васенин, А.А. Шахова	35
Применение критерия минимума среднеквадратической ошибки в задаче пространственной компенсации помех	
М.А. Глинянов, С.Ю. Болотова, В.Ю. Дорошенко	43
Корректировка операций робота-манипулятора с применением машинного зрения от третьего лица	
А.В. Городилов, А.И. Кононова	51
Голосовое управление в T-FLEX CAD как инструмент автоматизации проектирования и производственных процессов	
И.М. Пахомов, А.В. Козлова	60
Проблематика управления рисками в рамках строительного производства на основе аппарата нечеткой логики	
С.С. Антипов, В.Л. Бурковский	66
Разработка алгоритма предварительной обработки значений диагностических параметров и факторов для диагностики технического состояния оборудования электронной промышленности	
А.В. Чирков	75

Радиотехника и связь

Распределение количества сигналов, наблюдаемых на интервале сбора данных при измерениях занятости радиочастотного спектра	
В.Ю. Полев, В.А. Козьмин, А.Б. Токарев	83
Модель отражения эхо-сигнала от подстилающей поверхности при вертикальном многочастотном зондировании	
Д.Ю. Набережнев, С.С. Матвеев, Ю.В. Литвиненко	89
Нейросетевое декодирование LDPC и BCH кодов на основе обучаемых графовых архитектур	
М.В. Хорошайлова, А.В. Турецкий	94
Определение коэффициента расширения спектра при ЛВЧМ-модуляции методом корреляционной обработки	
М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, Р.С. Сухомлинов, Д.А. Пухов, Д.А. Кузнецов	101

Исследование эффективной площади рассеяния простых объемных тел при помощи лабораторной установки Т.С. Багунц, А.В. Володько, Е.А. Ищенко, Р.В. Кузьменко, Д.К. Проскурин, А.В. Рябкин.....	108
Формирование секторной диаграммы направленности линейной антенной решетки методом параметрической оптимизации А.В. Останков, В.В. Ковалевская.....	113
Оптимизация размещения антенных систем на бронетранспортере с использованием методов электродинамического моделирования Е.А. Ищенко, А.Е. Медведев, А.И. Скребнев, А.А. Силонов, А.И. Сукачев, И.А. Сафонов.....	121
Применение схемы двойного повышающего преобразования И.С. Бобылкин, В.А. Ванин, Е.М. Ивашкина, А.М. Безрукавый, А.В. Муратов.....	131
Оценка изменения волнового сопротивления в ближней зоне рассеяния электромагнитных волн Ю.Г. Пастернак, Д.В. Пацев, И.А. Сафонов, Е.А. Ищенко, Д.К. Проскурин, А.И. Сукачев.....	136
Повышение быстродействия гибридного нейросетевого LDPC-декодера за счёт эффективного использования DSP-блоков для свёрточных операций М.В. Хорошайлова, А.А. Пирогов, А.В. Турецкий	148
Разработка низкопрофильной патч-антенны с круговой поляризацией в диапазоне частот 900 – 950 МГц для систем управления беспилотными летательными аппаратами Е.Ю. Веселов.....	156
Методика проектирования печатных плат для работы с высокоскоростными цифровыми интерфейсами О.Н. Чирков, А.С. Костюков, А.П. Хрипунков.....	163
Машиностроение и машиноведение	
О влиянии порядка выполнения концентраторов на сопротивляемость динамическим нагрузкам листовых титановых сплавов с окисленной поверхностью А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский, И.И. Емельянов.....	174

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Methods and technologies for implementing a system for selecting recommendations of information resources in IT companies E.N. Korolev	7
Mathematical modeling of heat exchange processes in enclosures during a fire in a mine working I.N. Pozharkova	15
Development of a rating algorithm for selecting the preferred class instance of an analytical information system E.V. Kolykhalova, D.K. Proskurin	25
Algorithm for determining the optimal interval of influence of factors in crop yield modeling Ya.M. Ivanyo, E.S. Klimov	29
Improving the accuracy of time series forecasting using vector time coding and machine learning models S.L. Podval'ny, N.V. Savvin, D.N. Vasenin, A.A. Shakhova	35
Application of the standard error minimum criterion in the problem of spatial interference compensation M.A. Glinyanov, S.Yu. Bolotova, V.Yu. Doroshenko	43
Adjusting robot manipulator operations using third-person machine vision A.V. Gorodilov, A.I. Kononova	51
Voice control in T-FLEX CAD as a tool for automating design and production processes I.M. Pakhomov, A.V. Kozlova	60
Problems of risk management within the framework of organizational systems of the construction industry based on the apparatus of fuzzy logic S.S. Antipov, V.L. Burkovskiy	66
Development of an algorithm for the preliminary processing of diagnostic parameter and factor values for diagnosing the technical condition of electronic industry equipment A.V. Chirkov	75

Radio engineering and communication

Distribution of the number of signals observed in the data gathering interval when measuring the occupancy of the radio frequency spectrum V.Yu. Polev, V.A. Kozmin, A.B. Tokarev	83
Model of echo reflection from the underlying surface with vertical multi-frequency sensing D.Yu. Naberezhnev, S.S. Matveev, Yu.V. Litvinenko	89
Neural network decoding of LDPC and BCH codes based on trainable graph architectures M.V. Khoroshaylova, A.V. Turetskiy	94
Spreading factor estimation in linear frequency modulation using correlation processing M.A. Romashchenko, D.V. Vasil'chenko, R.S. Sukhomlinov, D.A. Pukhov, D.A. Kuznetsov	101
Laboratory setup for determining backscattering diagrams of volumetric bodies in the near zone T.S. Bagunts, A.V. Volod'ko, E.A. Ishchenko, R.V. Kuz'menko, D.K. Proskurin, A.V. Ryabikin	108
Formation of a sector radiation pattern of a linear antenna array by the method of parametric optimization A.V. Ostankov, V.V. Kovalevskaya	113

Optimization of locating antenna systems on an armored personnel carrier using electrodynamic modeling methods E.A. Ishchenko, A.E. Medvedev, A.I. Skrebnev, A.A. Silonov, A.I. Sukachev, I.A. Safonov..	121
Application of the double boost conversion scheme I.S. Bobylkin, V.A. Vanin, E.M. Ivashkina, A.M. Bezrukavy, A.V. Muratov.....	131
Assessment of change in wave resistance in the near zone of scattering of electromagnetic waves Yu.G. Pasternak, D.V. Patsev, I.A. Safonov, E.A. Ishchenko, D.K. Proskurin, A.I. Sukachev.....	136
Improving the performance of a hybrid neural network LDPC decoder by efficiently using DSP blocks for convolutional operations M.V. Khoroshaylova, A.A. Pirogov, A.V. Turetskiy.....	148
Development of a low-profile circularly polarized patch antenna for the 900 – 950 MHz frequency range for unmanned aerial vehicle control systems E.Yu. Veselov.....	156
Methodology of designing printed circuit boards for working with high-speed digital interfaces O.N. Chirkov, A.S. Kostyukov, A.P. Khripunkov.....	163

Mechanical engineering and science of machines

On the effect of the order of concentrator execution on the resistance to dynamic loads of titanium sheet alloys with an oxidized surface A.B. Kolomenskiy, S.V. Shakhov, B.A. Kolomenskiy, I.I. Emel'yanov.....	174
--	------------

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.3.001

УДК 681.3

МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОДБОРА РЕКОМЕНДАЦИЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ В ИТ-КОМПАНИИ

Е.Н. Королев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: решается задача выбора и обоснования алгоритма построения рекомендаций информационных ресурсов для сотрудников ИТ-компаний при решении задач, связанных с конкретным проектом. Кроме того, решается задача реализации компонент информационной системы для подбора информационных ресурсов. В итоге выбран алгоритм BRISMF (Biased Regularized Incremental Simultaneous Matrix Factorization), который основан на факторизации матриц. Разработаны компоненты web-ориентированной системы, выполняющей подбор рекомендаций с использованием методики коллаборативной фильтрации с реализацией алгоритма BRISMF. В качестве технологий реализации компонент этой системы были выбраны REST (Representational State Transfer) - архитектура, Spring Web Model-View-Controller, Spring Security, ORM (Object-Relational Mapping) фреймворк Hibernate. Доказана эффективность агрегирования интернет-ресурсов в рекомендательной системе за счет использования RES-архитектуры и web-сервисов, что позволяет легко интегрировать данные компоненты во внешние информационные системы. Получены результаты реализации предложенных алгоритмов в виде коллекции web-служб, которые можно использовать при создании масштабируемых и надежных сервисов, совместимых с любыми системами, реализованными на разных языках программирования и на разных платформах. Разработанные компоненты, интегрированные в информационные системы ИТ-компаний, позволят повысить эффективность поиска информационных ресурсов, необходимых для реализации крупных распределенных проектов

Ключевые слова: REST, Spring Framework, BRISMF, KNN (K-Nearest Neighbors), подбор рекомендаций, коллаборативная фильтрация

Введение

В настоящее время, когда технологии для проектирования и разработки информационных систем стремительно развиваются, ИТ-специалистам необходимо постоянно совершенствоваться и изучать новые методы и средства создания ИТ-продуктов. Существует множество сервисов, помогающих отслеживать интересные новинки, предлагающих персонализированные рекомендации контента, а также различные возможности для саморазвития и совершенствования знаний. Например, веб-площадка «Навр» позволяет читать статьи, удобно отслеживать интересные темы и новинки, а платформа «Youtube» предлагает хорошие рекомендации, основанные на интересах пользователя. Однако каждый такой сервис размещает только один вид контента, что упрощает его потребление, но усложняет поиск чего-то конкретного, ведь объемы информации огромны, и ориентироваться в них становится все сложнее. В частности, это становится проблемой для сотрудников ИТ-компаний, ведь повышение квалификации с помощью потребления

различного образовательного контента составляет большую часть их работы. В такой быстро развивающейся сфере критически важно следить за новинками в сфере технологий, а также перенимать опыт коллег из других компаний. Однако поиск подходящего ресурса по интересующей тематике может стать довольно сложным и затратным делом – необходимо изучить множество площадок, каждая из которых имеет свой интерфейс, свою базу пользователей, и не везде можно найти достаточное количество отзывов или оценок, чтобы сделать вывод о качестве материала. Так же за разными видами интернет-ресурсов придется обращаться к разным сервисам, а поисковая система выдает очень много информации, которую приходится фильтровать самостоятельно, и в которой так же сложно ориентироваться.

Таким образом, актуальной является задача разработки веб-приложения, которое позволяло бы пользователю удобно ориентироваться во множестве интернет-ресурсов, а также облегчало процесс обучения и поиска информации с помощью рекомендаций и различных подборок. В частности, необходимо имплементирован алгоритм для создания персонализированных рекомендаций на основе оценок поль-

зователей, а также алгоритм для поиска похожих ресурсов на основе их тэгов.

Разработанный для этих целей сервис будет предоставлять такие функции, как:

- добавление ссылки на интернет-ресурс (предоставляя тэги, которые наилучшим образом отражают его суть);

- агрегирование ресурсов путем интеграции со сторонними сайтами и использования публичного api (Application Programming Interface), например, Habr, или Dev.to;

- возможность поставить оценку ресурсу и написать комментарий;

- возможность добавить ресурс в избранное;

- определение схожих по смыслу ресурсов для рекомендации пользователю;

- определение персонализированных рекомендаций сотрудникам IT-компании;

- выработка контекстных рекомендаций от IT-компании своим сотрудникам;

- выработка различных тематических подборок;

- выбор сотрудником компании тем для получения рекомендаций и возможность указать их в личном профиле с целью формирования наиболее актуальных рекомендаций;

- возможность отслеживать новые ресурсы на платформе, одобрять или отклонять их, если они не соответствуют IT-тематике, а также менять их тэги;

- создавать различные тематические подборки ресурсов;

- просматривать статистику по всем ресурсам (просмотры страниц, оценки, добавления в избранное).

Анализ и выбор рекомендательных алгоритмов

Существуют различные подходы к реализации рекомендательных систем, в соответствии с которыми можно их разделить на группы. Прогнозирование предпочтений пользователя на основе коллаборативной фильтрации является наиболее распространенной методикой. В основе коллаборативной фильтрации лежит тот факт, что рекомендации генерируются на основе анализа поведения отдельных пользователей или групп пользователей, у которых можно выделить похожие предпочтения. При реализации методов коллаборативной фильтрации следует выделить три основных подхода:

1. Подход, основанный на соседстве (Neighbourhood-based, NB) [1, 2], утверждает,

что подходящими объектами для пользователя являются те, которые высоко оцениваются его «соседями».

2. Подход, основанный на модели, включающей факторизацию матриц (Model-based, matrix factorization, MF) [1, 2, 3] и который предполагает, что оценка пользователя определяется небольшим количеством скрытых факторов, таких как страна происхождения, тематика и другие.

3. Гибридный подход, который объединяет два предыдущих подхода. Он является наиболее распространенным и позволяет существенно повысить качество рекомендаций.

В качестве алгоритма формирования рекомендаций информационных ресурсов в IT-компании выбран BRISMF. Данный алгоритм реализует подход факторизации матриц, который часто применяется в контексте коллаборативной фильтрации. Он характеризуется хорошей масштабируемостью, что позволяет улучшать его характеристики по мере роста базы пользователей. Кроме того, BRISMF отличается высокой скоростью работы и способен обрабатывать как явные, так и неявные пользовательские рейтинги [4]. Явные рейтинги представляют собой оценки, выставленные пользователями ресурсам, тогда как неявные касаются фактов просмотра информационных ресурсов.

Для решения задачи подбора рекомендаций информационных ресурсов в IT-компании алгоритм BRISMF отлично подходит в силу того, что полученные от пользователей оценки качества просмотренных информационных ресурсов можно представить в виде матрицы рейтингов. В дальнейшем все полученные рекомендации информационных ресурсов для сотрудников будут обрабатываться с использованием алгоритма k-ближайших соседей. Этот алгоритм основывается на принципе компактности и предполагает, что объекты, находящиеся близко друг к другу в пространстве, имеют схожие характеристики. Данный принцип используется в рекомендательных системах при автоматической классификации объектов. Простота реализации алгоритма и совместимость с используемой в нашей задаче моделью данных делают его особенно привлекательным. Оценка событий по шкале от 1 до 5 также значительно облегчает реализацию.

Выбор технологий для реализации компонент системы подбора рекомендаций информационных ресурсов

В качестве языка разработки была выбран Java SE 11. Автоматизация сборки проекта выполнена с использованием фреймворка Apache Maven. Использование данного средства облегчает подключение применяемых фреймворков и управление версиями проекта. Maven выполняет сборку проекта системы подбора рекомендации информационных ресурсов на основе описания его структуры на языке POM, который хранит информацию в формате XML. Файл pom.xml использовался для подключения плагинов и зависимостей.

Разработка велась на Spring framework. За основной паттерн разработки был взят MVC. Использование Spring Web MVC предоставляет возможность применять архитектуру модель-представление-контроллер (MVC) и включает готовые компоненты, которые были использованы в разработке веб-приложения для системы подбора рекомендаций информационных ресурсов. Применение шаблона MVC позволило разделить различные аспекты приложения, такие как логика ввода, бизнес-логика и логика пользовательского интерфейса, что обеспечило слабую связь между элементами, реализующими эти аспекты.

В рамках данного шаблона можно выделить три основных компонента:

1. Модель представления данных, которая представляет собой объект POJO и содержит данные о каком-либо объекте.

2. Само представление предназначено для визуализации данных модели в виде HTML страницы, которая возвращается клиенту и отображается в браузере.

3. Контроллер предназначен для обработки входных данных от пользователя с целью формирования соответствующей модели данных и последующей передачи этой модели в представление для визуализации в браузере в виде HTML страницы.

При проектировании системы подбора рекомендаций информационных ресурсов в IT-компания принято решение реализовать компонент системы в виде коллекции веб-служб и использовать REST-архитектуру в качестве основного стиля построения распределенной системы. REST-архитектура поддерживается Web-фреймворком Spring MVC, который выбран основным при реализации системы.

Реализация основных компонентов системы подбора рекомендаций интернет-ресурсов в виде веб-служб с архитектурой REST позволит упростить создание масштабируемых и надежных сервисов и, кроме того, данная архитектура совместима с любыми языками программирования и позволит повысить производительность за счет кеширования ответов на промежуточных серверах [6].

При такой реализации каждый ресурс в разработанной системе будет иметь уникальный глобальный идентификатор URL. Доступ к этим ресурсам будет выполняться на основе стандартных HTTP-методов. При этом все адреса URL будут иметь строго заданный формат представления для организации доступа. Любые данные в системе будут однозначно идентифицироваться через свой URL, который будет выполнять функцию первичного ключа для этих данных в системе подбора рекомендаций информационных ресурсов [5].

Реализация основных сервисов и алгоритмов системы подбора рекомендаций информационных ресурсов выполнена в трех следующих классах:

1. Класс BRISMFSERVICE реализует основной сервис, который выполняет функцию обработки переданных данных и выполняет их конвертацию в формат, необходимый для алгоритма градиентного спуска, который реализован в классе GradientDescent.

2. Класс CFService функционирует как «обертка» для BRISMFSERVICE. Данный сервис передает запросы и обрабатывает результаты от метода getTopFiveUserPredictions(), при этом дополняя их необходимыми данными.

3. Класс EvaluationEntity применяется только в реализации алгоритма подбора рекомендаций. Экземпляр этого класса хранит информацию об идентификаторе объекта и идентификаторе пользователя системы.

Разработанное приложение реализует алгоритм KNN (k-ближайших соседей). Перед запуском алгоритма требуется выбрать все оценки, выставленные конкретным пользователем. В случае отсутствия оценок у пользователя запуск алгоритма нецелесообразен: сервер отправит ответ с соответствующим статусом ошибки, который будет виден пользователю. Если же у пользователя имеется хотя бы одна оценка, необходимо провести выборку всех похожих пользователей, которые оценили те же события. Пользователи с похожими оценками рассматриваются как потенциально близкие по используе-

мым технологиям коллеги, решающие схожие задачи при разработке IT-продуктов.

Полученные кортежи данных (пользователь – событие – оценка) служат основой для формирования матрицы оценок пользователей, которую необходимо передать алгоритму в качестве входных данных. После этого для каждой строки (каждого пользователя) вычисляется евклидово расстояние, затем отбираются *k* наименьших значений расстояний, что позволяет формировать рекомендации ресурсов на основе соответствующих данных пользователей.

Для отображения данных в разработанном приложении, в соответствии с применяемой концепцией MVC, использовался компонент View. Для реализации этого компонента, относящегося к клиентской части системы, использовался фреймворк Angular. Функцией контроллера (Controller), реализуемого на стороне сервера, является формирование данных для отображения компонентом View. Данная схема реализована в фреймворке Spring MVC с помощью диспетчера сервлетов. Диспетчер сервлетов (Dispatcher Servlet) переадресует клиентские запросы нужным классам реализации контроллеров. А классы контроллеров соответственно используют сервисы (Service), которые реализуют бизнес-логику подбора рекомендаций информационных ресурсов для сотрудников IT-компаний. Сохранение, обновление, получение и обмен данных происходят через репозитории (Repository) с помощью сервисов, оперирующих моделями, которые являются POJO объектами. Репозитории обращаются к базе данных, получая и передавая модели сущностей, которые являются программным отображением сущностей базы данных, то есть таблиц [7].

Для работы с базой данных в разработанном приложении, для маппинга сущностей базы данных на сущности ООП, для генерации необходимых SQL запросов использовалась технология Hibernate. Hibernate – это ORM фреймворк, который предназначен для языка Java с открытым исходным кодом для работы с базами данных. Он позволяет создавать связи между таблицами базы данных с использованием объектно-реляционной модели. Использование Hibernate даст нам возможность работать с базой данных не напрямую, а через ассоциированные с таблицами объекты, реализованные как экземпляры Java классов. При этом применялись следующие объекты Hibernate:

– Transaction для представления единицы работы с БД, которая обрабатывается менеджером транзакций;

– SessionFactory предназначен для создания сеансов работы с базой данных и создается в единственном экземпляре в самом начале работы. Для каждой базы данных требуется создание своей SessionFactory;

– Configuration используется для создания объекта SessionFactory и настраивает Hibernate при помощи специального XML-файла, который содержит инструкции для обработки объекта Session;

– Session используется для получения физического соединения с БД. Обычно этот объект создается только при необходимости, и он закрывается в конце использования.

– Query использует HQL для обмена информацией с базой данных. Это необходимо для связывания параметров, разбиения возвращаемых результатов в целях ограничения объема, а также для осуществления запроса;

Для построения систем идентификации и аутентификации использовался фреймворк Spring Security. При этом задача аутентификации пользователя была решена следующим образом:

– после корректного ввода имени и пароля пользователем он получает возможность входа в систему. При выборе имени предлагается использовать e-mail, на который будет отправляться различная информация. Экземпляр класса UsernamePasswordAuthenticationToken (экземпляр интерфейса Authentication) сохраняет имя и пароль пользователя. Экземпляр класса AuthenticationManager получает эти значения для идентификации;

– при ошибочном вводе имени и пароля пользователя выбрасывается исключение BadCredentialsException с сообщением «Identification error»;

– при успешной аутентификации возвращается заполненный экземпляр класса Authentication;

– с помощью вызова метода SecurityContextHolder.getContext().setAuthentication(...) для пользователя устанавливается контекст безопасности и при этом передается объект, который вернул экземпляр класса AuthenticationManager.

Для создания клиентской части приложения для рекомендации ресурсов использовался Vue.js. В качестве языка программирования использовался TypeScript.

Разработанное приложение в соответствии с используемой концепцией MVC содержит контроллеры, сервисы, модели и репозитории. Функцию обработчика запросов на стороне

сервера выполняют контроллеры. Они реализованы через классы, аннотированные `@Controller`. Таким образом Spring (в частности, Dispatcher Servlet) будет идентифицировать этот класс как «приемник» запросов. На методах стоят аннотации `@GetMapping("...")` и `@PostMapping("...")`, они определяют конкретный запрос, который принимают (GET, POST), и путь (url), на который запрос приходит (такую же функцию выполняет аннотация `@RequestMapping` над самим классом контроллера, только она определяет префикс пути к любому методу из данного контроллера).

В рамках приложения, в соответствии с диаграммой классов, реализовано восемь контроллеров:

- `AuthController` – для обработки запросов, связанных с авторизацией;
- `CompanyController` – для обработки запросов, связанных с компаниями;
- `ProjectController` – для обработки запросов, связанных с проектами;
- `RecommendationsController` – для обработки запросов, связанных с рекомендациями;
- `ResourceController` – для обработки запросов, связанных с интернет-ресурсами;
- `SelectionController` – для обработки запросов, связанных с подборками;
- `StatisticsController` – для обработки запросов, связанных с получением статистики;
- `UserController` – для обработки запросов, связанных с пользователями.

Так же были имплементированы различные сервисы. В коде они реализованы классами, аннотированными `@Service`. Эта аннотация, по сути, лишь сообщает компилятору, что данный класс является бином, т.е. аналогична аннотации `@Bean`, но под аннотацией `@Service` принято реализовывать бизнес-логику приложения.

Можно выделить восемь основных сервисов, которые реализуют бизнес-логику системы подбора информационных ресурсов в IT-компаниях:

- `CommentService` – реализует логику, связанную с комментариями пользователей системы;
- `CompanyService` – реализует логику, связанную с компаниями;
- `ProjectService` – для логики, связанной с проектами;
- `RecommendationsService` – для логики, связанной с рекомендациями;
- `ResourceService` – для логики, связанной с интернет-ресурсами;

- `SelectionService` – для логики, связанной с тематическими подборками;

- `StatisticsService` – для логики, связанной со статистикой;

- `UserService` – для логики, связанной с пользователями.

В соответствии с построенной диаграммой сущностей были разработаны java классы, которые соответствуют сущностям разработанной базы данных и мапятся на них с помощью Hibernate.

В коде такие классы помечены аннотацией `@Entity`, которая означает, что данная сущность является сущность JPA. Аннотация `@Table` поясняет, с какой таблицей из базы данных мапится эта сущность. Наличие `@Entity` подразумевает наличие аннотации `@Id`, которая указывает на поле, являющееся уникальным идентификатором данного объекта. `@GeneratedValue` означает, что значение идентификатора должно генерироваться автоматически (также есть возможность явно создать в базе данных последовательности, и в параметрах аннотации указать их названия, тогда идентификаторы будут генерироваться с помощью созданных нами последовательностей).

Для более гибких настроек маппинга полей можно указывать аннотацию `@Column`, в параметрах которой четко прописывать название или тип, который данное поле будет иметь в таблице базы данных.

Для реализации связей между сущностями один к одному, один ко многим и многие ко многим используются аннотации `@ManyToOne`, `@ManyToMany`, `@OneToOne`.

В приложении, в соответствии с диаграммой классов, создано десять базовых сущностей:

- `AuthorizationRole` – отвечает за данные о ролях пользователей;

- `Comment` – передает информацию о комментариях;

- `Company` – передает информацию о компаниях;

- `Project` – передает информацию о проектах;

- `Resource` – передает информацию об интернет-ресурсах;

- `Selection` – передает информацию о различных тематических подборках;

- `Statistics` – передает информацию о статистике пользовательских действий (оценки, добавления в избранное, рекомендации и т.д.);

- `Tag` – передает информацию о тэгах, характеризующих ресурсы;

- `User` – передает информацию о пользователях;

– `UserResourceMark` – передает информацию об оценках, которые пользователь ставил ресурсам, а также о том, какие ресурсы он добавил в избранное.

С непосредственно моделями работают только репозитории, о которых будет рассказано ниже, и частично сервисы. Для принятия/отправки запросов с клиента/на клиент в приложении используются так называемые сущности `Data Transfer Object (DTO)`. Они содержат в себе только те данные из оригинальной сущности, которые ей нужны. Таким образом, клиент не получает больше данных, чем ему надо, а количество данных, пересылаемых в запросах, становится значительно меньше. Для перевода сущностей в `DTO` и обратно в приложение внедрен маппинг, который реализован с помощью технологии `MapStruct`. `MapStruct` — это генератор кода, который значительно упрощает реализацию отображений между типами `Java`-бинов на основе соглашения о конфигурации. В проекте он реализован в абстрактных классах, созданных для каждого типа `DTO` и расширяющих базовый абстрактный класс. В большинстве случаев маппинг происходит автоматически. То есть, при запуске программы генерируются классы, являющиеся наследниками абстрактных классов, в которых реализуется логика маппинга. Технология опирается на названия и типы полей классов. В случае же, если есть несоответствие между полями и нужна более сложная логика, можно прописать гибкие настройки для конкретных полей в аннотациях `@Mappings`, `@Mapping`. Эти аннотации указываются над соответствующими методами классов.

Для реализации связей с таблицами был разработан слой репозитория, включающий десять репозитория:

– `AuthorizationRoleRepository` – обеспечивает связь с таблицей `user_roles`, хранящей данные о ролях пользователей в системе;

– `CommentRepository` – обеспечивает связь с таблицей `comments`, хранящей данные о комментариях, оставленных к ресурсам;

– `CompanyRepository` – обеспечивает связь с таблицей `companies`, хранящей данные об ИТ-компаниях;

– `SelectionRepository` – обеспечивает связь с таблицей `selections`, которая содержит данные о различных подборках, которые создаются администратором;

– `ProjectRepository` – обеспечивает связь с таблицей `projects`, хранящей данные о рабочих проектах;

– `ResourceRepository` – обеспечивает связь с таблицей `resources`, которая содержит данные об интернет-ресурсах;

– `StatisticsRepository` – обеспечивает связь с таблицей `statistics`, которая хранит данные о статистике, то есть о действиях пользователя с такими ресурсами как выставление оценки, добавление в избранное и т.д.;

– `TagRepository` – обеспечивает связь с таблицей `tags`, хранящей данные о тэгах, используемых для характеристики интернет-ресурса;

– `UserRepository` – обеспечивает связь с таблицей `users`, хранящей данные о пользователях;

– `UserResourceMarkRepository` – обеспечивает связь с таблицей `user_resource_marks`, хранящей данные об оценках пользователем информационного ресурса, а также о том, добавил ли он данный ресурс в избранное.

Заключение

Выполнен анализ работы основных рекомендательных алгоритмов и особенностей имплементации. Проведен анализ средств и технологий разработки веб-приложений. Изучены выбранные для имплементации алгоритмы и разработаны компоненты веб-ориентированной системы отслеживания интернет-ресурсов ИТ-направленности. Выполнены имплементация системы рекомендаций информационных ресурсов и интеграция с внешними ресурсами.

Реализованный функционал получения пользователями персонализированных рекомендаций был имплементирован с помощью алгоритма `BRISMF`, основанного на матричной факторизации. Также были внедрены рекомендации похожих ресурсов, которые реализованы с помощью алгоритма `k`-ближайших соседей. Кроме того, реализованное приложение было дополнено различными тематическими подборками, а также возможностью отслеживать интернет-ресурсы, которые заинтересовали сотрудников компании, где работает пользователь. Разработанные компоненты допускают возможность интеграции с внешними системами для повышения эффективности агрегирования интернет-ресурсов.

Компоненты информационной системы подбора рекомендаций информационных ресурсов в ИТ-компании разработаны с помощью `Spring framework`. За паттерн разработки был взят `MVC`.

В виде отдельных сервисов реализован алгоритм создания рекомендаций BRISMF, основанный на факторизации матриц оценок. Web-компоненты информационной системы спроектированы на основе REST-архитектуры, что позволило повысить эффективность масштабирования за счет оптимизации взаимодействия между сервером и клиентом. Использование этой архитектуры также повысило производительность за счет уменьшения нагрузки на сервер — так, информацию о предыдущих запросах клиента теперь не нужно отдельно сохранять в каком-либо хранилище.

Созданные RESTful веб-службы для системы подбора рекомендаций информационных ресурсов для сотрудников IT-компаний обеспечивают полное разделение клиентской и серверной части, что предоставляет возможность их независимого развития. REST совместим с любыми технологиями и платформами, поэтому их изменение не окажет негативного влияния и обеспечит совместимость и интеграцию с любыми другими системами. Таким образом, выбранные технологии способствуют повышению гибкости разработанной системы подбора рекомендаций для информационных ресурсов.

Кроме того, приложение было дополнено различными тематическими подборками, а также возможностью отслеживать интернет-ресурсы, заинтересовавшие сотрудников компании, в которой работает пользователь. В системе была имплементирована интеграция с внешним сайтом для повышения эффективности агрегирования интернет-ресурсов.

В результате был создан сервис, направленный, в частности, на использование сотрудниками IT-компаний, а также любыми пользователями которые развиваются в IT-направлении. Данный сервис позволит им лучше ориентироваться в различных интернет-ресурсах, упростит поиск актуального контента по интересующей теме, а также поможет повысить свою квалификацию, изучая ресурсы, актуальные для решения необходимых им задач в IT-компаниях, в которых они работают.

По результату данной работы можно сделать следующие выводы:

– в качестве алгоритма формирования рекомендаций информационных ресурсов в IT-компаниях рекомендован BRISMF, который реализует подход факторизации матриц и применяется в контексте коллаборативной фильтрации.

Он характеризуется хорошей масштабируемостью, что позволяет улучшать его характеристики по мере роста базы пользователей. Кроме того, BRISMF отличается высокой скоростью работы и способен обрабатывать как явные, так и неявные пользовательские рейтинги;

– доказана эффективность агрегирования интернет-ресурсов в рекомендательной системе за счет использования REST архитектуры и web-сервисов, что позволяет легко интегрировать данные компоненты во внешние информационные системы.

– получены результаты реализации предложенных алгоритмов в виде коллекции веб-служб, которые можно использовать при создании масштабируемых и надежных сервисов совместимых с любыми системами, реализованными на разных языках программирования.

Литература

1. Koren Y., Ave P., Park F. Factorization Meets the Neighborhood: a Multifaceted Collaborative Filtering Model // KDD '08 Proceeding of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (2008). Pp. 426-434.
2. Takács G., Pilászy I., Németh B., Tikk D. Major components of the Gravity recommendation system // ACM SIGKDD Explorations Newsletter - Special issue on visual analytics. Vol. 9. Is. 2. December 2007. Pp. 80-83.
3. Takács G., Pilászy I., Németh B., Tikk D. Scalable Collaborative Filtering Approaches for Large Recommender Systems. // The Journal of Machine Learning Research. Vol. 10, 12/1/2009. Pp. 623-656.
4. Scalable Collaborative Filtering Approaches for Large Recommender Systems / G. Takács, I. Pilászy, B. Németh, D. Tikk // Journal of Machine Learning Research. 2009. № 10. Pp. 623-656.
5. Королев Е.Н., Королева М.Е. Реализация системы подбора рекомендаций с использованием методики коллаборативной фильтрации // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах: тр. Междунар. молодежной науч. школы. Воронеж: ВГТУ, 2023. С. 85-88.
6. Королев Е.Н., Королева М.Е. Использование REST архитектуры при реализации системы подбора рекомендаций на основе методики коллаборативной фильтрации // Интеллектуальные информационные системы: тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 40-летию кафедры САПРИС. Воронеж: ВГТУ, 2024. С. 339-342.
7. Королев Е.Н., Королева М.Е. Разработка компонент информационной системы подбора рекомендаций для формирования команды на основе коллаборативной фильтрации // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж: ВГТУ, 2023. С. 229-231.

Информация об авторе

Королев Евгений Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ekorolev@cchgeu.ru

METHODS AND TECHNOLOGIES FOR IMPLEMENTING A SYSTEM FOR SELECTING RECOMMENDATIONS OF INFORMATION RESOURCES IN IT COMPANIES

E.N. Korolev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in this article, the author solves the problem of selecting and substantiating an algorithm for constructing recommendations for information resources for employees of an IT company. In addition, the author describes the solution to the problem of implementing components of an information system for selecting information resources. As a result, I selected the BRISMF algorithm, which is based on matrix factorization. Components of a Web-oriented system that performs the selection of recommendations using the collaborative filtering technique were developed. I selected REST architecture, Spring Web Model-View-Controller, Spring Security, and the Hibernate ORM framework as technologies for implementing the components of this system. The efficiency of aggregating Internet resources in a recommendation system has been proven through the use of REST architecture and Web services, which makes it easy to integrate these components into external information systems. I obtained the results of the implementation of the proposed algorithms in the form of a collection of Web services that can be used to create scalable and reliable services compatible with any systems implemented in different programming languages and on different platforms. The developed components integrated into IT companies' information systems will make it possible to increase the efficiency of searching for information resources necessary for the implementation of large distributed projects

Key words: REST, Spring Framework, BRISMF, KNN (K-Nearest Neighbors), selection of recommendations, collaborative filtering

References

1. Koren Y., Ave P., Park F. "Factorization meets the neighborhood: a multifaceted collaborative filtering model", *KDD '08 Proceeding of the 14th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2008, pp. 426-434.
2. Takács G., Pilászy I., Németh B., Tikk D. "Major components of the Gravity recommendation system", *ACM SIGKDD Explorations Newsletter - Special issue on visual analytics*, December 2007, vol. 9, issue 2, pp. 80-83.
3. Takács G., Pilászy I., Németh B., Tikk D. "Scalable collaborative filtering approaches for large recommender systems", *The Journal of Machine Learning Research*, 2009, vol. 10, pp. 623-656.
4. Gábor Takács, István Pilászy, Bottyán Németh, Domonkos Tikk "Scalable collaborative filtering Approaches for large recommender systems", *Journal of Machine Learning Research*, 2009, no. 10, pp. 623-656
5. Korolev E.N., Koroleva M.E. "Implementation of a recommendation selection system using the collaborative filtering technique", *Proc. of the Int. Youth Sci. School: Optimization and Modeling in Automated Systems (Optimizatsiya i modelirovanie v avtomatizirovannykh sistemakh)*, Voronezh, 2023, pp. 85-88.
6. Korolev E.N., Koroleva M.E. "Using REST architecture in the implementation of a recommendation selection system based on the collaborative filtering technique", *Proc. of the Int. Sci. and Prac. Conf. Dedicated to the 40th Anniversary of the SAPRIS Department: Intelligent Information Systems (Intellektual'nye informatsionnye sistemy)*, Voronezh, 2024, pp. 339-342.
7. Korolev E.N., Koroleva M.E. "Development of components of the information system for selecting recommendations for team formation based on collaborative filtering", *Proc. of the Winners of the Competition of Scientific Research Works of Students and Postgraduates of VSTU in Priority Areas of Science and Technology Development (Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti: sb. tr. pobediteley konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov i aspirantov VGTU po prioritetnym napravleniyam razvitiya nauki i tekhnologii)*, Voronezh State Technical University, 2023, pp. 229-231.

Submitted 13.03.2025; revised 30.05.2025

Information about the author

Evgeniy N. Korolev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ekorolev@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4441-0979>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ОГРАЖДЕНИЯХ ПРИ ПОЖАРЕ В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

И.Н. Пожаркова

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Россия
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация: рассмотрены возможности математического моделирования на базе программы Fire Dynamics Simulator процессов теплопередачи в ограждениях горной выработки объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов. Обоснованы отличия температурного режима пожара в подобном сооружении от условий стандартных испытаний строительных конструкций на огнестойкость. Рассмотрен метод моделирования теплообмена в твердых телах при известном тепловом воздействии на основе численного решения одномерного уравнения теплопроводности. Описана модель горной выработки, включающая устройства для фиксации тепловых параметров газовой среды, температуры на поверхности и внутри горной породы на заданной глубине. Определен способ задания тепловых воздействий на ограждения, эквивалентных фиксируемым датчиками при моделировании пожара. Исследована чувствительность результатов моделирования к настройкам источника тепла, размеру ячеек расчетной сетки, величине временного шага, начальной температуре, исходному температурному профилю твердого тела, объему нагреваемого элемента и другим параметрам. Сделан вывод, что приемлемые точность и длительность расчета наблюдаются при задании источника тепла элементом «Приток», который позволяет обеспечить необходимое значение плотности теплового потока на поверхности ограждения, обуславливающее соответствующую величину температуры поверхности, а также температуру газа. Установлено, что значения температуры внутри ограждения совпадают с полученными при синхронном моделировании процессов теплообмена в газовой среде и теплообмена в горной породе при пожаре на объекте

Ключевые слова: моделирование пожара, вычислительная гидродинамика, Fire Dynamics Simulator (FDS), горная выработка, подземная исследовательская лаборатория, тоннель, теплоперенос, тепловое воздействие

Введение

Одной из задач в области пожарной безопасности является оценка огнестойкости ограждающих конструкций сооружений при воздействии высоких температур, наблюдающихся при пожаре как непосредственно в зоне горения, так и в зоне теплового воздействия от конвективных газовых потоков и излучения.

Натурные испытания для установления времени достижения ограждением предельного состояния по огнестойкости (в том числе потере несущей способности, теплоизолирующей способности, целостности) проводятся в соответствии с ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» и предусматривают нагрев элементов конструкций, помещаемых в испытательную печь с системой подачи и сжигания топлива. Порядок испытаний включает создание стандартного температурного режима, подразумевающего изменение температуры в печи по заданной функции:

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1), \quad (1)$$

где T – температура в печи, соответствующая времени t , °С;

T_0 – температура в печи до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °С;

t – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Допустимые относительные отклонения от T средней измеренной температуры в печи T_{cp} , которая определяется по показаниям термоэлектрических преобразователей, устанавливаемых не менее чем в пяти местах камеры, составляют от $\pm 5\%$ до $\pm 15\%$ в зависимости от интервала времени.

Также могут обеспечиваться иные тепловые воздействия, отличные от стандартного температурного режима, в соответствии с известными условиями, описывающими динамику прогресса газовой среды при реальном пожаре.

Очевидно, что подобные испытания ограничиваются исследованием предельных состояний отдельных конструкций и не могут быть проведены для ограждений уже существующего объекта.

Аналогично, при анализе огнестойкости ограждений горных выработок, шахт и т.п. сооружений возможно изучение изменения свойств при нагреве только отдельных образ-

цов горной породы. При этом отсутствуют требования, определяющие размер исследуемых образцов, необходимый и достаточный для обеспечения эквивалентности процессов распространения тепла в образце относительно массивного ограждения. Кроме того, остаются неясными тепловые условия проведения испытаний, поскольку реальный температурный режим при пожаре в подобном сооружении большого объема [1] будет отличаться от стандартного, создаваемого согласно функции (1).

Подобных ограничений можно избежать, применяя современные методы математического моделирования теплообмена, которые потенциально способны дать прогноз при пожаре значений температур ограждения на разном расстоянии относительно поверхности, а также определить начальные условия, необходимые для выполнения прочностных расчетов конструкций при тепловых воздействиях.

Целью исследования, результаты которого отражены в данном материале, является оценка возможностей расчета динамики прогрева при пожаре ограждений подземной исследовательской лаборатории объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов [1], размещенной в горной выработке глубокого заложения, на основе численного решения одномерного уравнения теплопроводности.

Обзор литературы

В работах [2, 3] представлен обзор программного обеспечения, которое может применяться для исследования огнестойкости строительных конструкций. Авторами установлено, что целесообразно при решении подобных задач использовать пакеты программ, такие как ABAQUS UNIFIED FEA, ANSYS, Autodesk Inventor Nastran и др., позволяющие выполнять как статические, так теплотехнические расчеты, на основе одной и той же трехмерной модели конструкции и общей среды моделирования.

Подобный подход использован при проведении исследования, результаты которого отражены в [4]. А именно, на базе программы Fire Dynamics Simulator (FDS) реализовано синхронное моделирование процессов теплообмена в газовой среде при пожаре в тоннельном сооружении глубокого заложения и теплообмена в ограждениях горной выработки. При этом отмечена чрезвычайно высокая длительность расчета и требовательность к вычислительным ресурсам при выполнении подобного моделирования – для 550 секунд модельного

времени физическая длительность расчета составляет более 100 часов при аппаратных характеристиках компьютера: тактовая частота процессора – 3,40 ГГц, число ядер процессора – 4, объем оперативной памяти – 16 Гб [4].

В руководстве FDS [5] указывается возможность проведения расчета теплообмена в твердом теле при заданных условиях окружающей среды. При этом тепловые свойства воздуха могут быть описаны как постоянными величинами, так и временными функциями или массивами. Поскольку высокую длительность расчета в FDS процессов при пожаре в первую очередь обуславливает численное решение нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных для газовой среды (уравнений Навье-Стокса), которые описывают теплообмен в ней при горении [1], представляет интерес исследование возможностей моделирования в FDS процессов теплообмена в ограждениях по предварительно полученным данным о значениях температуры газа и плотности теплового потока в заданные моменты времени. При решении в FDS только уравнения теплопроводности расчет будет значительно ускорен и за счет сокращения вычислений в газовой фазе, и вследствие использования более грубой сетки, т.к. для расчета теплопередачи в твердом теле FDS достаточно 4 ячеек по каждой координатной оси [5].

Заявленная проблема требует решения следующих задач:

- определение способа задания тепловых воздействий на ограждения, эквивалентных фиксируемым датчиками при моделировании пожара;
- оценка влияния начального профиля температуры твердого тела на результаты измерений;
- анализ точности моделирования при задании тепловых воздействий массивом значений, полученных экспериментально, и постоянной величиной, соответствующей среднему значению экспериментальных данных;
- анализ динамики прогрева для разных объемов твердого тела;
- анализ чувствительности результатов моделирования к настроечным параметрам модели: величине временного шага, размеру ячейки расчетной сетки, начальной температуре, моменту активации твердого тела и др.

Методы исследования

При выполнении исследования использована версия программы FDS 6.7.9 [5], а также ее русскоязычный графический интерфейс – программа Pygosim [6].

Для расчета распространения тепла в твердых материалах при отсутствии внутреннего источника тепловыделения FDS реализует численное решение одномерного уравнения теплопроводности, предполагающего наличие теплопередачи только в одном направлении – нормальном к поверхности [5]:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где t – момент времени, с;

x – расстояние от поверхности твердого тела, м;

$T_s(x,t)$ – температура твердого тела на расстоянии x от поверхности в момент времени t , К;

ρ_s – плотность материала твердого тела, кг/м³;

c_s – удельная теплоемкость материала твердого тела, Дж/кг·К;

k_s – теплопроводность материала твердого тела, Вт/м·К.

Для устойчивого решения уравнения (2) в FDS применяются конечно-разностные численные методы с неявной или полунеявной схемой [5]. Граничным условием при выполнении расчета является температура поверхности:

$$-k_s \frac{\partial T_s(0,t)}{\partial x} = q_s, \quad (3)$$

где $T_s(0,t)=T_w(t)$ – температура поверхности твердого тела, К;

$q_s = q_c + q_r$ – плотность результирующего (полного) теплового потока на поверхности твердого тела, включающая конвективную q_c и лучистую q_r , составляющие, Вт/м².

Следует отметить, что величины q_c , q_r и T_w , вычисляемые в FDS, взаимозависимы, т.е. рассчитанная на каждом шаге моделирования температура поверхности твердого тела влияет на плотность результирующего теплового потока, его составляющие и наоборот.

Уравнения (2), (3) решаются для каждой ячейки сетки, содержащей границу между газом и твердым телом. Таким образом, вначале рассчитываются параметры газа в ячейке сетки, ближайшей к твердому телу, затем, для известной температуры у поверхности и интенсивности излучения, выполняется вычисление плот-

ностей теплового потока, температуры на поверхности и внутри тела. При этом учитываются его усредненные тепловые свойства – ρ_s , c_s , k_s . Расчет температуры внутри тела T_s включает автоматический выбор размера ячейки сетки, в зависимости от толщины слоя материала и коэффициента его температуропроводности $k_s / (\rho_s \cdot c_s)$ [5].

При проведении экспериментов использована базовая модель тоннельного сооружения – горной выработки глубокого заложения подземной исследовательской лаборатории объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов, описанная в [1, 4], с параметрами, представленными на рис. 1.

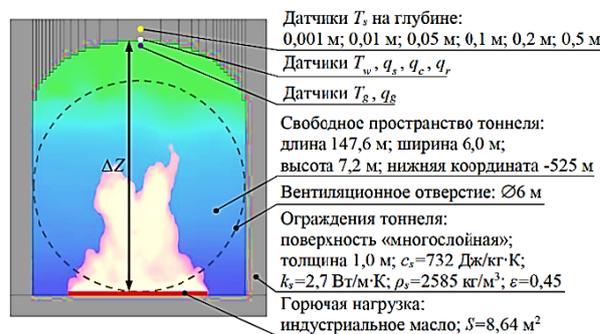


Рис. 1. Параметры модели горной выработки

На основе синхронного моделирования пожара и прогрева твердых тел в FDS с использованием данной модели для различных точек пространства установлены временные зависимости тепловых параметров газовой среды вблизи ограждений, температуры на поверхности и внутри горной породы на заданной глубине [1, 4]. Соответствующие данные сохранены в формате *.csv.

Для исследования возможностей асинхронного расчета в FDS температуры газовой среды и динамики прогрева горной породы использованы комбинации следующих модификаций базовой модели:

– вместо источника пожара – горючей нагрузки с известными свойствами [7], задается эквивалентный источник тепла (ИТ), создающий тепловой поток в исследуемой точке на поверхности ограждения, постоянная составляющая которого близка к среднему значению q_s , полученному в квазистационарном режиме пожара (используются главное меню «Модель / Редактировать поверхности / Создать / Тип поверхности / Приток (Нагреватель)» и «Модель / Создать вентиляционное отверстие / Поверхность / Приток (Нагреватель)» [6]);

– закругление (уточнение) расчетной сетки – задание минимального a_{min} и максимального a_{max} размера ячеек по осям (главное меню «Модель / Редактировать сетки» [6]);

– максимального шага моделирования t_{max} (главное меню «Анализ / Параметры моделирования / Время»);

– нагрев отдельного твердого элемента малого объема во фрагменте модели.

Кроме того, рассмотрены возможности задания в модели: времени начала расчета; начальной температуры окружающей среды; области начальных значений температуры газовой среды в пространстве горной выработки; начального температурного профиля ограждений; устройства управления, активирующего в

заданный момент времени ИТ и участок ограждения [6].

При проведении экспериментов анализируемые физические величины $T_g, q_g, q_s, q_c, q_r, T_w, T_s$ фиксируются датчиками (рис. 1), а также устройствами измерения типа «Граничные величины» для сохранения трехмерных полей температуры и плотности тепловых потоков на поверхности ограждений.

Результаты и обсуждение

Настроечные параметры модели, применяемые в экспериментах, для которых получены наиболее репрезентативные результаты, приведены в табл. 1. Результаты моделирования – в табл. 2.

Таблица 1

Настроечные параметры моделей

Эксперимент	ИТ			$a_{min},$ м	$a_{max},$ м	$t_{max},$ с
	тип	геометрия	свойства			
1 (базовый)	Горелка	$\Delta Z=7,2$ м; $S=8,64$ м	$q_{ИТ}=1836$ кВт/м ²	0,1	0,3	-
полномасштабная модель	2.1	Нагреватель $\Delta Z=0,6$ м; $S=8,64$ м	$q_{ИТ}=13$ кВт/м ² ; $K_{ИТ}=1$	0,6	0,6	-
	2.2	Нагреватель $\Delta Z=0,6$ м; $S=8,64$ м	$q_{ИТ}=12,5$ кВт/м ² ; $K_{ИТ}=f(t)$	0,6	0,6	0,1
	2.3	Нагреватель $\Delta Z=1,2$ м; $S=8,64$ м	$q_{ИТ}=27$ кВт/м ² ; $K_{ИТ}=f(t)$	0,6	0,6	0,1
	2.4	Нагреватель $\Delta Z=7,2$ м; $S=8,64$ м	$q_{ИТ}=310$ кВт/м ² ; $K_{ИТ}=f(t)$	0,6	0,6	0,1
	3.1	Приток $\Delta Z=0,6$ м; $S=8,64$ м	$q_{ИТ}=9,1$ кВт/м ² ; $Q=0,4$ м ³ /с; $K_{ИТ}=1$	0,6	0,6	-
	3.2	Приток $\Delta Z=0,6$ м; $S=8,64$ м	$q_{ИТ}=8,8$ кВт/м ² ; $Q=0,4$ м ³ /с; $K_{ИТ}=f(t)$	0,6	0,6	0,1
	3.3	Приток $\Delta Z=1,2$ м; $S=8,64$ м	$q_{ИТ}=14,5$ кВт/м ² ; $Q=4$ м ³ /с; $K_{ИТ}=f(t)$	0,6	0,6	0,1
	3.4	Приток $\Delta Z=7,2$ м; $S=8,64$ м	$q_{ИТ}=200$ кВт/м ² ; $Q=23$ м ³ /с; $K_{ИТ}=f(t)$	0,6	0,6	0,1
фрагмент модели	4.1	Нагреватель $\Delta Z=0,1$ м; $S=0,16$ м	$q_{ИТ}=6,1$ кВт/м ² ; $K_{ИТ}=1$	0,1	0,1	-
	4.2	Нагреватель $\Delta Z=0,01$ м; $S=0,16$ м	$q_{ИТ}=6,1$ кВт/м ² ; $K_{ИТ}=1$	0,01	0,1	-
	4.3	Нагреватель $\Delta Z=0,01$ м; $S=0,16$ м	$q_{ИТ}=6,1$ кВт/м ² ; $K_{ИТ}=f(t)$	0,01	0,1	0,1
	4.4	Нагреватель $\Delta Z=0,01$ м; $S=0,16$ м	$q_{ИТ}=6,1$ кВт/м ² ; $K_{ИТ}=f(t)$	0,01	0,1	0,01
	5.1	Приток $\Delta Z=0,1$ м; $S=0,16$ м	$q_{ИТ}=6,1$ кВт/м ² ; $Q=0,005$ м ³ /с; $K_{ИТ}=1$	0,1	0,1	-
	5.2	Приток $\Delta Z=0,1$ м; $S=0,16$ м	$q_{ИТ}=6,1$ кВт/м ² ; $Q=0,005$ м ³ /с; $K_{ИТ}=f(t)$	0,1	0,1	0,1
	5.3	Приток $\Delta Z=0,1$ м; $S=0,16$ м	$q_{ИТ}=6,1$ кВт/м ² ; $Q=0,005$ м ³ /с; $K_{ИТ}=f(t)$	0,1	0,1	0,01

Таблица 2

Результаты моделирования

Эксперимент	$T_{g,cp},$ °С	$q_{g,cp},$ кВт/м ²	$q_{s,cp},$ кВт/м ²	$T_{w,max},$ °С	$RMSE,$ °С	Время моделирования, с	
1 (базовый)	305,4	4,9	6,1	75,9	-	191448	
полномасштабная модель	2.1	206,8	5,6	6,4	76,1	4,0	81
	2.2	202,3	5,4	6,2	75,7	2,7	82
	2.3	70,5	6,1	6,2	75,8	1,3	116
	2.4	92,0	6,3	6,0	74,3	1,0	405
	3.1	323,1	5,1	6,5	76,3	3,2	112
	3.2	306,6	5,1	6,3	75,9	2,8	124
	3.3	303,8	5,0	6,2	75,6	1,2	256
	3.4	240,8	5,7	6,2	74,9	1,5	1047
фрагмент модели	4.1	231,7	5,8	5,9	71,7	4,9	2
	4.2	226,4	5,8	6,1	74,0	3,6	2
	4.3	227,9	5,9	6,1	75,1	0,8	4
	4.4	227,6	5,9	6,1	75,2	0,3	28
	5.1	324,8	5,6	6,2	74,4	2,7	2
	5.2	325,5	5,6	6,2	75,6	1,0	4
	5.3	324,9	5,6	6,2	75,7	0,7	27

В результате моделирования пожара в горной выработке установлено, что в заданных

условиях (эксперимент 1 – базовый) наибольшие значения температуры газовой среды и

теплового излучения от газа в ближайшей к ограждению ячейке расчетной сетки модели для рассмотренного периода моделирования (0–300 с) наблюдаются над зоной горения и составляют $491,5\text{ °C}$ и $11,0\text{ кВт/м}^2$ соответственно (рис. 2, кривая 1), их средние значения в квазиустановившемся режиме пожара (после 150 с модельного времени) – $T_{g,cp} = 305,7\text{ °C}$ и $q_{g,cp} = 4,9\text{ кВт/м}^2$ (табл. 2). Очевидно, что подобная динамика отлична от стандартного температурного режима, определяемого выражением (1) (рис. 2, пунктирная кривая).

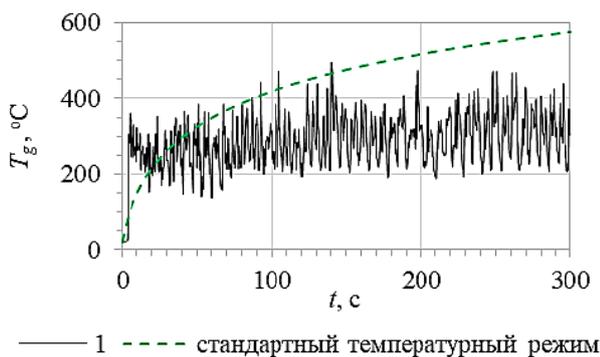


Рис. 2. Временной график температуры газовой среды вблизи ограждения горной выработки, полученный в базовом эксперименте

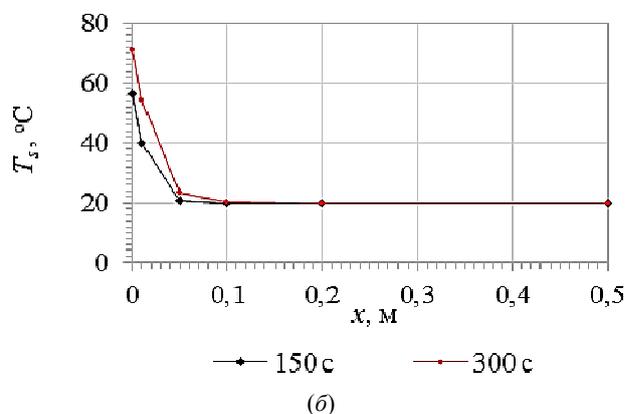
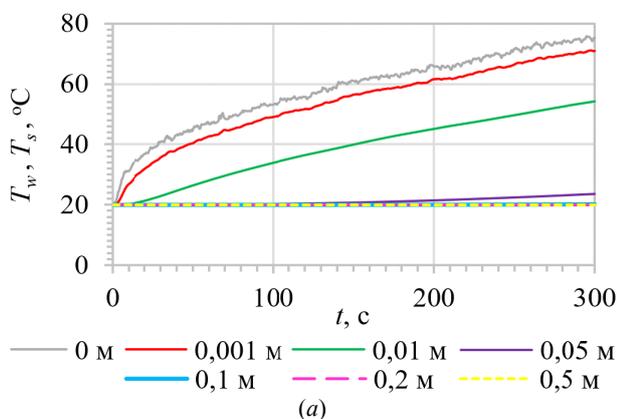


Рис. 4. Графики температуры ограждения горной выработки на глубине x , полученные в базовом эксперименте

Оценка качества результатов расчета, полученных на базе модифицированных моделей, производилась по величине абсолютного среднеквадратического отклонения температуры T_w (табл. 2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{wi} - \widehat{T_{wi}})^2}{n}}, \quad (4)$$

где T_{wi} , $\widehat{T_{wi}}$ – значения температуры для i -й точки выборки, определенные на основе базовой и модифицированной моделей, соответственно;

На поверхности ограждений средняя доля лучистой составляющей теплового потока q_r составляет около 60 % (рис. 3).

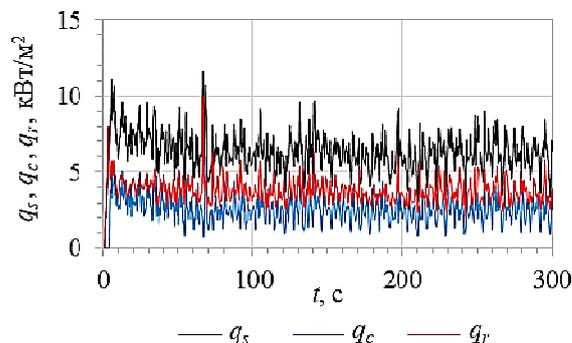


Рис. 3. Временные графики тепловых потоков на поверхности ограждения горной выработки, полученные в базовом эксперименте

Динамика температур ограждения на различной глубине x в соответствующей плоскости приведена на рис. 4, а. Распределение температур по глубине x в различные моменты модельного времени может быть описано температурным профилем (рис. 4, б).

Нужно подчеркнуть, что на глубине $x \geq 0,1\text{ м}$ рост T_s за рассмотренный период моделирования не превышает $0,07\text{ °C}$.

n – размер выборки.

Вычисление по выражению (4) метрики $RMSE$ (Root Mean Squared Error) выполнялось после обработки экспериментальных характеристик с использованием линейной интерполяции с целью их синхронизации по оси абсцисс [1].

Для создания источника тепла, эквивалентного источнику пожара, использованы элементы «Нагреватель» и «Приток» (табл. 1). Варьируемыми параметрами ИТ для получения значений q_s , соответствующих определенным в эксперименте 1, являлись: расстояние до по-

верхности ΔZ (рис. 1), постоянная $q_{ИТ}$ и переменная $K_{ИТ}$ составляющие плотности полного теплового потока, создаваемый объемный расход воздуха Q (для элемента «Приток»). Учитывая (3), а также соотношения между конвективной и лучистой составляющими теплового потока (рис. 3) в настройках элементов была выбрана опция «Полный тепловой поток» (меню «Модель / Редактировать поверхности / Термические свойства / Граничные условия модели» [6]).

Значения $q_{ИТ}$ определялись по формуле

$$q_{ИТ} = K \cdot q_{s,ср}, \quad (5)$$

где $q_{s,ср}$ – среднее арифметическое значений q_s , полученных в эксперименте 1 для интервала времени 150–300 с (квазиустановившийся режим пожара), кВт/м²;

K – определяемый эмпирически коэффициент, введенный для коррекции плотности теплового потока с учетом параметров ИТ.

Экспериментальные данные (табл. 2) позволяют сделать вывод, что целевые значения q_s и T_w могут быть получены при задании ИТ как элементом «Приток», так и «Нагреватель».

При этом в зависимости от расстояния ΔZ между ИТ и нагреваемой поверхностью требуется корректировка коэффициента K , входящего в формулу (5), который имеет меньшие значения при использовании элемента «Приток» за счет создаваемого потока горячего воздуха в направлении обогреваемой поверхности, характеризующегося объемным расходом Q . Надо заметить, что результаты, полученные в экспериментах с элементом «Приток», могут быть достигнуты и при иных комбинациях значений $q_{ИТ}$ и Q для одинаковых ΔZ .

При идентичных исходных параметрах модели время расчета меньше, если ИТ задается элементом «Нагреватель». Однако применение элемента «Нагреватель» не позволяет обеспечить значение температуры газа T_g в окрестности ограждения, близкое к определенному в базовом эксперименте. При использовании подобного ИТ лучистая составляющая теплового потока преобладает над конвективной, в отличие от базового эксперимента и экспериментов с элементом «Приток», где q_r и q_c соизмеримы (рис. 3, рис. 5, в).

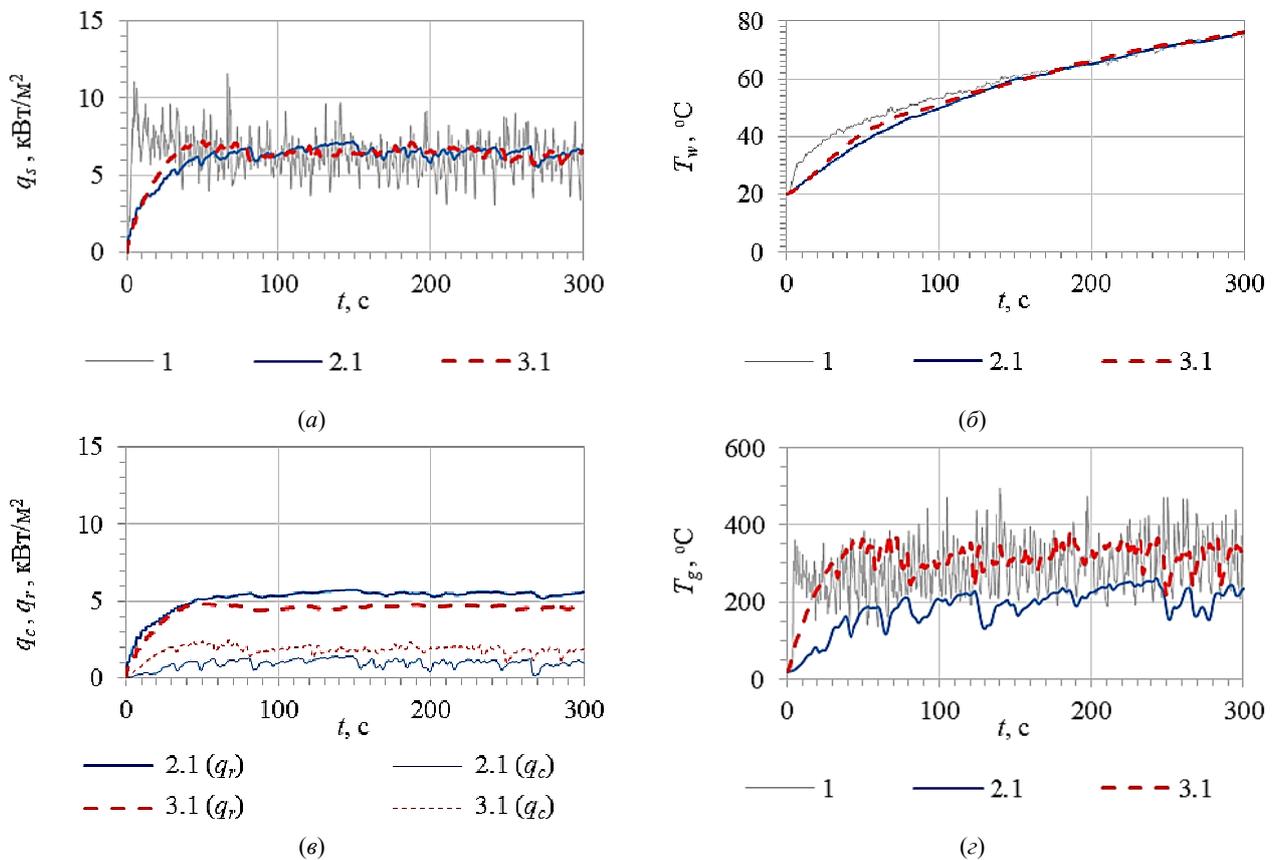


Рис. 5. Временные графики тепловых параметров поверхности ограждения и газовой среды, полученные в экспериментах 1, 2.1, 3.1

При проведении экспериментов 2.1, 3.1, 4.1, 4.2, 5.1 в настройках ИТ указывалась только постоянная составляющая плотности теплового потока – $q_{ИТ}$, определяемая по формуле (5) (табл. 1). Наибольшие отклонения T_w от полученных в эксперименте 1 фиксируются на начальном этапе моделирования (до 100 с модельного времени) (рис. 5, б) и могут быть объяснены сглаживанием функции q_s , которая на данном этапе в базовом эксперименте имеет более высокие значения по сравнению с квазистационарным режимом (рис. 5, а), что приводит к более интенсивному прогреву ограждений.

В серии экспериментов 2.2–2.4, 3.2–3.4, 4.3, 4.4, 5.2, 5.3 исследована возможность моделирования прогрева ограждений горной выработки при задании переменного тепловыделения элементами «Нагреватель» и «Приток» в соответствии с таблицей значений $q_s(t)$, полученной в эксперименте 1 для интервала времени 0–300 с. В этом случае при настройке параметров поверхности указывалась как постоянная составляющая плотности полного теплового потока $q_{ИТ}$ в соответствии с (5), так и его переменная составляющая в виде временной зависимости $K_{ИТ}(t)$, которая в табличной форме задает учитываемую при расчете в каждый момент времени долю $q_{ИТ}$ и определяется:

$$K_{ИТ}(t) = f(t) = q_s(t)/q_{s,sp}. \quad (6)$$

При проведении экспериментов 2.2–2.4, 3.2–3.4 на базе полномасштабной модели уста-

новлено, что варьирование параметров ИТ с учетом (6) и размера максимального шага моделирования t_{max} позволяет обеспечить большую или меньшую детализацию функции плотности теплового потока (рис. 6, а) и, соответственно, различную степень совпадения T_w с полученной в базовом эксперименте на всем периоде моделирования (рис. 6, б), характеризующуюся значением $RMSE$ (табл. 2).

При учете переменной составляющей плотности теплового потока (эксперименты 2.2–2.4, 3.2–3.4) $RMSE$ не превышает 3 °С. Следует отметить, что подобное совпадение достигается при размерах ячеек расчетной сетки a_{min} и a_{max} существенно больших, чем используемые в базовой модели, что обуславливает значительное сокращение времени расчета (табл. 2).

С учетом динамики температуры газовой среды (рис. 2) была предпринята попытка моделирования процессов только для квазиустановившегося режима пожара. Однако после запуска расчета наблюдается перераспределение температур ограждения и их последующее отклонение относительно полученных в базовом эксперименте. Дополнительное уточнение начальных параметров расчетной модели путем задания в свойствах твердого тела ранее определенного температурного профиля (рис. 4, б), температуры воздуха и момента появления в модели исследуемого участка ограждения положительного влияния на целевые характеристики, фиксируемые в рассматриваемой локальной области пространства, не оказали.

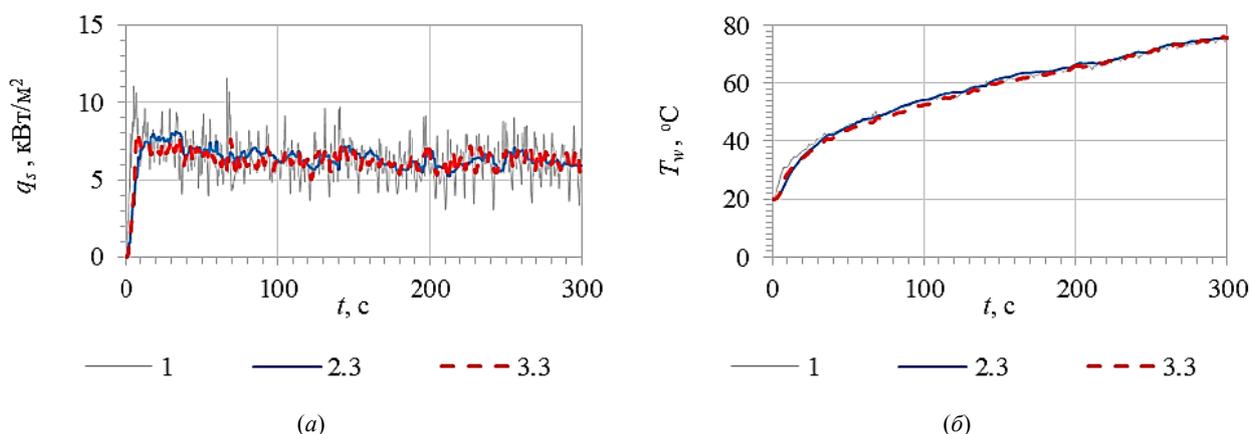


Рис. 6. Временные графики тепловых параметров поверхности ограждения, полученные в экспериментах 1, 2.3, 3.3

В экспериментах 4.1–5.3 выполнялся нагрев отдельного элемента ограждения в минимально допустимой для моделирования теплопередачи в FDS области, равной 4 ячейкам расчетной сетки в каждом направлении [5]. Ис-

пользовался фрагмент модели, ограниченный сеткой размером 0,4 м × 0,4 м по осям X и Y, а по оси Z – 0,4 м (эксперименты 4.1, 5.1–5.3) или 0,04 м (эксперименты 4.2–4.4). Толщина прогреваемой конструкции при таком расчете оп-

ределяется параметром твердой поверхности «THICKNESS» [5], который в данном исследовании принимался равным 1 м (рис. 1). За исключением ИТ и нагреваемого элемента остальным поверхностям в рассматриваемом фрагменте модели присвоен тип ADIABATIC – данные поверхности не участвуют в теплообмене с газовой средой [1].

Установлено, что значения a_{min} и t_{max} оказывают влияние на результаты экспериментов. При этом наиболее существенное отклонение T_w наблюдается при изменении размера ячеек сетки по оси Z (табл. 2).

Из сравнения результатов в данной серии экспериментов и описанных выше с идентичными настройками ИТ можно сделать вывод, что при одномерном моделировании теплопередачи, реализуемом в FDS, объем элемента не влияет на процессы его прогрева. В экспериментах 4.3, 4.4, 5.2, 5.3, где учтена переменная составляющая плотности теплового потока, $RMSE$ не превышает 1 °C (табл. 2). При этом за

счет незначительного рассеяния тепла в воздушном пространстве, ограниченном сеткой малого объема, реализуется возможность задать q_{IT} равным определенному в базовом эксперименте $q_{s,exp}$, т.е. не использовать дополнительную коррекцию в соответствии с (5). Кроме того, длительность расчета на базе фрагмента модели существенно сокращается (табл. 2).

Наименьшие отклонения от базового эксперимента температуры поверхности ограждений T_w наблюдаются при ограничении временного шага до 0,01 с (эксперименты 4.4, 5.3), однако в этом случае время моделирования выше на порядок по сравнению с аналогичными экспериментами 4.3, 5.2, проведенными с $t_{max} = 0,1$ с (табл. 2).

Для модификации модели, примененной в экспериментах 4.1–5.3 также справедливо, что значение температуры газа T_g в окрестности ограждения, близкое к определенному в базовом эксперименте, может быть получено с использованием элемента «Приток» (рис. 7, а).

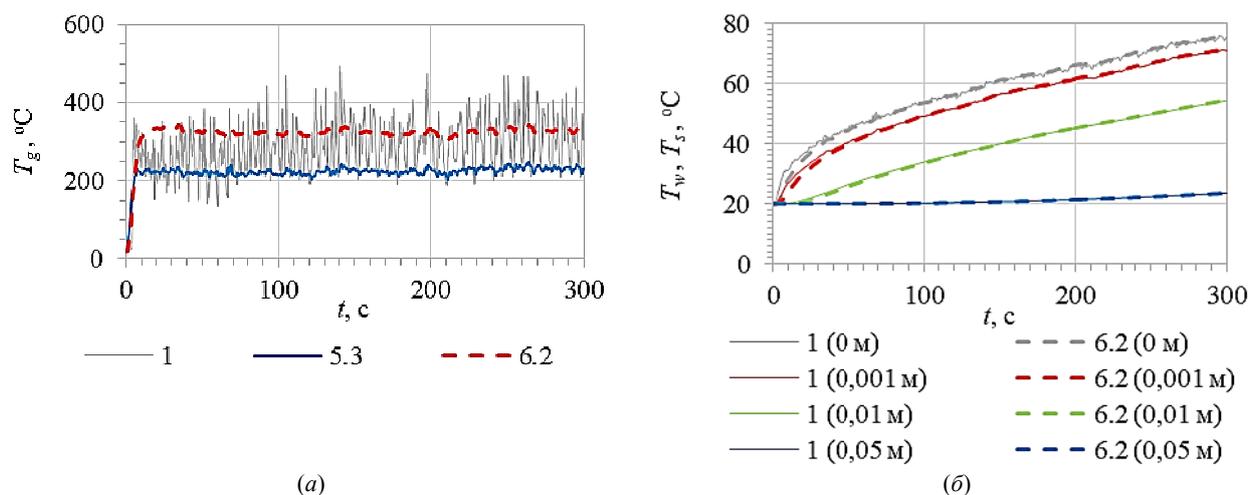


Рис. 7. Временные графики тепловых параметров поверхности ограждения и газовой среды, полученные в экспериментах 1, 4.3, 5.2

Необходимо обратить внимание, что результаты моделирования температуры внутри ограждений T_s в экспериментах с наименьшими значениями $RMSE$ (табл. 2) совпадают с полученными в базовом эксперименте (рис. 7, б).

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что в FDS возможно выполнение асинхронного расчета температурного режима пожара в горной выработке и динамики прогрева его ограждений при тепловом воздействии. Такой подход позволяет значительно со-

кратить время вычислений температуры ограждений, ограничиваясь численным решением в FDS только уравнения теплопроводности.

Можно сделать вывод, что с точки зрения соотношения точности и длительности расчета, при решении подобной задачи рекомендуется применение настроек моделирования, соответствующих:

- эксперименту 4.3 при исследовании только процессов нагрева твердого тела;
- эксперименту 5.2 при исследовании процессов нагрева как твердого тела, так и газовой среды;

– эксперименту 3.3 при исследовании процессов на базе полномасштабной модели.

Задание источника тепла элементом «Приток» позволяет обеспечить не только необходимое значение плотности полного теплового потока на поверхности ограждения q_s , которое, согласно (3), обусловит соответствующую величину температуры на поверхности ограждения T_w и внутри него T_s , но и требуемую температуру газа T_g . Такой подход может быть интересен при моделировании в FDS прогрева строительных конструкций в условиях стандартного температурного режима, задаваемого временной функцией температуры воздуха (1).

Следует отметить, что нельзя признать удовлетворительными результаты моделирования динамики прогрева ограждений в рассматриваемом сооружении для периода времени, ограниченного квазиустановившимся режимом пожара.

Таким образом, доказано, что в FDS возможно проведение оценочных экспериментов, для прогнозирования температуры поверхности ограждений горной выработки при известных тепловых воздействиях. В силу использования в FDS одномерного уравнения теплопроводности, программа не позволит корректно промоделировать распространение тепла между областями горной породы разного минерального состава, с учетом процессов на границах слоев, различных коэффициентов теплового расширения составляющих, размера минеральных зерен, трещиноватости, наличия нескольких слоев отделочных материалов, огнезащитных покрытий и других факторов. Заслуживает внимания, что в редакции FDS 6.8.0 представлена бета-версия трехмерного моделирования теплопередачи в твердом теле [5].

Детальное исследование прогрева неоднородного материала со слоями, имеющими различные тепловые свойства, возможно при использовании программных комплексов, реализующих метод конечных элементов, считающийся наиболее эффективным современным методом для решения инженерных и физических задач [3]. Помимо программ, способных выполнять и теплотехническое, и статическое моделирование процессов, например ANSYS,

FlowVision, Логос Тепло, возможно организовать передачу данных, полученных в FDS при моделировании пожара, в программы, которые предназначены для расчета огнестойкости строительных конструкций в заданных условиях и реализующие метод конечных элементов (BoFire, BRANZ-TR8, SMPST, COMPSL, FIRES-T3 и др. [2, 3]). Помимо величин тепловых потоков q_c , q_r и температуры поверхности ограждения T_w параметром, позволяющим эффективно задать условия для теплообмена, является вычисляемая в FDS адиабатическая температура поверхности [5]. Передача данной величины в программу, выполняющую трехмерное моделирование теплопроводности, позволит как получить более детальный прогноз температуры внутри ограждений, так и выполнить оценку возможных их механических деформаций при пожаре.

Литература

1. Пожаркова И.Н. Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33. № 4. С. 22–35.
2. Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Обзор программного обеспечения расчета огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 3. С. 44–53.
3. Ланской П.С., Корольченко Д.А. Анализ существующих специализированных программных комплексов, пригодных для расчетов и решения междисциплинарных задач при моделировании огневых воздействий на строительные конструкции // Пожаровзрывобезопасность. 2023. Т. 32. № 6. С. 13–24.
4. Пожаркова И.Н. Технология оценки прогрева горной породы при пожаре в подземной исследовательской лаборатории // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. № 9. С. 71–83.
5. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-1. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, 2023. 206 с.
6. Pyrosim 2023.3. Руководство пользователя // FireCat – pyrosim.ru : сайт. URL: https://www.pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf (дата обращения: 01.02.2025).
7. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М.: Академия ГПС МВД России, 2005. 118 с.

Поступила 03.03.2025; принята к публикации 09.06.2025

Информация об авторе

Пожаркова Ирина Николаевна – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (662972, Россия, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1); докторант, доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и про-

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN ENCLOSURES DURING A FIRE IN A MINE WORKING

I.N. Pozharkova

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: the article considers the possibilities of mathematical modeling of heat transfer processes in the enclosures of a mine working of a final isolation facility for radioactive waste based on the Fire Dynamics Simulator program. We substantiated the differences in the temperature regime of a fire in such a structure from the conditions of standard tests of building structures for fire resistance. We considered a method for modeling heat exchange in solids with a known thermal effect based on the numerical solution of a one-dimensional heat conductivity equation. We described a model of a mine working, including devices for recording the thermal parameters of the gas environment, the temperature on the surface and inside the rock at a given depth. We determined a method for setting thermal effects on the enclosures equivalent to those recorded by sensors during fire modeling. We studied the sensitivity of the modeling results to the settings of the heat source, the size of the cells of the computational grid, the value of the time step, the initial temperature, the initial temperature profile of the solid, the volume of the heated element and other parameters. We concluded that acceptable accuracy and calculation duration are observed when specifying the heat source by the "Inflow" element, which allows for the required value of heat flux density on the surface of the enclosure, which determines the corresponding value of the surface temperature, as well as the gas temperature. We established that the temperature values inside the enclosure coincide with those obtained during synchronous modeling of heat and mass transfer processes in a gas environment and heat exchange in rock during a fire at the facility

Key words: fire modeling, computational fluid dynamics, Fire Dynamics Simulator (FDS), mine workings, underground research laboratory, tunnel, heat transfer, thermal effects

References

1. Pozharkova I.N. "Study of the temperature regime of a fire in an underground research laboratory based on numerical modeling", *Fire and Explosion Safety (Pozharovzryvobezopasnost')*, 2024, vol. 33, no. 4, pp. 22–35.
2. Eremina T.Yu., Korol'chenko D.A. "Overview of software designated for the analysis of fire resistance of building structures exposed to various fire models", *Fire and Explosion Safety (Pozharovzryvobezopasnost')*, 2020, vol. 29, no. 3, pp. 44–53.
3. Lansky P.S., Korol'chenko D.A. "Analysis of existing specialized software suitable for calculations and solving interdisciplinary tasks in modelling fire effects on building structures", *Fire and Explosion Safety (Pozharovzryvobezopasnost')*, 2023, vol. 32, no. 6, pp. 13–24.
4. Pozharkova I.N. "Technology for assessing the heating of rock during a fire in an underground research site laboratories", *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, vol. 12, no. 7, pp. 71–83.
5. "Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide", volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-1. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, 2023, 206 p.
6. "Pyrosim 2023.3. User guide. FireCat – pyrosim.ru, available at: https://www.pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf. (date of access: 01.02.2025).
7. Koshmarov Yu.A. "Forecasting hazardous factors of indoor fire" ("Prognozirovanie opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii"), State Fire Academy EMERCOM of Russia, 2005, 118 p.

Submitted 03.03.2025; revised 09.06.2025

Information about the author

Irina N. Pozharkova, Cand. Sc. (Technical), Associate professor, Professor, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia (1 Severnaya str., Zheleznogorsk 662972, Russia); Doctoral Candidate, Associate Professor, Siberian Federal University (79 Svobodny av., Krasnoyarsk 660041, Russia), e-mail: pozharkova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1153-350X>

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕЙТИНГОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО ЭКЗЕМПЛЯРА КЛАССА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Е.В. Колыхалова, Д.К. Проскурин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описываются методы подготовки набора данных, содержащих значения критериев, влияющих на подбор и рейтингование участников проекта. В рамках исследования были подготовлены наборы данных на основании сведений, содержащихся в различных информационных базах организации. Были определены анализируемые критерии, а также выполнено извлечение данных и их очистка и преобразование для возможности дальнейшей эффективной работы с критериями участников проектов. На начальном этапе произведен расчет весов критериев и применен метод главных компонент (РСА). Использование РСА позволило эффективно уменьшить размерность данных, сохраняя ключевые структуры и взаимосвязи между ними. Чтобы учесть значения критериев за прошлые периоды, была введена дополнительная функциональность, позволяющая сохранять исторические данные и учитывать динамику показателей в расчетах текущего рейтинга. Построение прогностической модели выполнено с применением методов машинного обучения, в частности были использованы нейронные сети. Однако впоследствии предполагается расширить набор используемых методов машинного обучения, увеличить количество учитываемых критериев, а также попробовать применить разработанные методы и алгоритмы к другим наборам данных

Ключевые слова: разработка алгоритма, информационная система, оценка критериев, нейронные сети

Введение

Сегодня многие вузы стремятся использовать механизмы управления проектами для решения задач организационного и технологического развития. Для эффективного проведения изменений необходим механизм управления, обеспечивающий координацию действий сотрудников различных подразделений. В качестве такого механизма часто предлагается использовать автоматизированную информационную систему. Основными функциональными требованиями к такой системе, как правило, являются возможность вести учет проектов вуза, привлекать к проектам сотрудников и студентов с необходимыми компетенциями, отслеживать статус проектов и минимизировать организационные издержки и, соответственно, сроки выполнения проектов. Вопросы организации данных в информационных системах, предназначенных для хранения исторических данных, поднимались ранее в [1-3].

У каждого потенциального участника проекта есть ряд компетенций. Каждая компетенция может быть оценена некоторым весом и имеет некоторую ценность для успешной реализации проекта. Участники проекта, как и проекты, являются сложными объектами, которые можно представить в виде многокритериальной модели, в которой один из показателей должен быть привязан к моменту времени.

Отдельной задачей в рамках разработки системы автоматизации управления проектами

является разработка механизмов отбора участников проекта.

С учетом предположения о необходимости разработки многоальтернативной системы в рамках данной задачи предполагается разработка механизмов, позволяющих решать задачу отбора оптимальных участников проекта в зависимости от входных параметров. Вопросы поиска оптимальных методов рейтингования потенциальных участников проектов поднимались в [4].

Использование элементов искусственного интеллекта в качестве механизма отбора участников проекта по весам компетенций позволит учитывать большое количество зависимостей и не тратить время на составление формул для выполнения таких расчетов.

Подготовка набора данных

Подготовка качественного набора данных является важной частью любого аналитического проекта, позволяющей получать достоверные и ценные инсайты о предмете исследования.

Подготовка набора данных о компетенциях участников проекта для последующего анализа требует внимательного подхода, поскольку данные хранятся в различных источниках корпоративной информационной системы.

На первом этапе было проведено определение целей анализа и выбраны необходимые поля, которые необходимы для достижения поставленных целей.

Участниками проектов могут быть как студенты, так и преподаватели или другие сотрудники. При этом есть общие поля, характеризующие и студентов, и сотрудников:

- ФИО,
- Возраст,
- Опыт участия в аналогичных проектах,
- Наличие публикаций по теме проекта,
- Специальность,
- Подразделение,
- Дополнительная информация (например, социально-экономический статус, психологические характеристики).

Но есть и поля, актуальные только для какой-то одной категории. Например, для студентов может быть важным включить в выборку такие поля как:

- Средний балл по предметам,
- Посещаемость занятий,
- Участие во внеклассных мероприятиях.

Вторым этапом подготовки набора данных является извлечение данных из баз. Используя инструменты SQL и специальные интерфейсы корпоративной информационной системы, были извлечены необходимые данные из баз. После извлечения данные были очищены от дубликатов записей, заполнены пропущенные значения, исправлены ошибки и выполнено приведение данных к единому формату. Для обработки данных удобно использовать библиотеки Python (pandas).

Основные шаги очистки:

- Проверка наличия пустых значений (NaN, NULL) и обработка пропусков (замещение средними значениями, медианой или удалением строк);
- Приведение всех дат к одному формату;
- Удаление лишней информации (например, ненужных столбцов);
- Приведение значений численных переменных к правильному типу данных (целые числа, вещественные числа и т.п.).

В результате подготовки получен качественный набор данных, готовый для анализа, на котором можно провести статистическое исследование, визуализировать зависимости и сделать выводы, отвечающие на вопросы исследования.

Решение задачи определения весов критериев

Изначально мы не знаем веса критериев, поэтому формулируем задачу оптимизации следующим образом: нам нужно подобрать такие веса, чтобы сумма квадратов ошибок была минимальной.

Необходимо определить такие веса для каждого критерия, чтобы минимизировать расхождение между итоговым рейтингом и предсказанным результатом. Веса должны быть положительными и суммарно равняться единице. Эти веса показывают относительную важность каждого критерия в формировании итоговой оценки.

Таким образом, предложенное решение помогает быстро рассчитать оптимальные веса критериев, основываясь на реальных данных, обеспечивая прозрачность и обоснованность распределения приоритетов при проведении оценки компетенций участников проекта.

Учитывая большое количество потенциальных участников и критериев, был применен метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) для уменьшения размерности пространства признаков.

Метод главных компонент — один из наиболее популярных методов линейного снижения размерности пространств признаков [5]. Его суть заключается в преобразовании исходного набора признаков таким образом, чтобы новые признаки были ортогональны друг другу и максимизировали дисперсию исходных данных.

В рамках применения метода главных компонент была выполнена нормализация данных. Для правильного функционирования метода каждый признак был приведен к нулевому среднему значению и единичной дисперсии. Это важно, поскольку компоненты PCA чувствительны к масштабированию признаков. После этого было выполнено вычисление ковариационной матрицы. Ковариационная матрица отражает корреляционные связи между признаками и позволяет определить направления максимальной вариации данных.

На следующем этапе произведено нахождение собственных значений и собственных векторов. Собственные значения отражают вклад каждой главной компоненты в общую дисперсию данных, а собственные векторы задают направления новых осей координат.

Были выбраны первые 5 главных компонент, соответствующих наибольшему собственным значениям, которые суммарно сохраняют заданную долю общей дисперсии.

Исходные данные спроектированы на пространство новых главных компонент, уменьшая тем самым размерность.

Таким образом, PCA позволило эффективно уменьшить размерность данных, сохраняя ключевые структуры и взаимосвязи между ними.

Учет влияния исторических значений критериев на итоговую оценку

Чтобы учесть значения критериев за прошлые периоды, была введена дополнительная функциональность, позволяющая сохранять исторические данные и учитывать динамику показателей в расчетах текущего рейтинга. Для этого был создан отдельный модуль для хранения исторических данных о потенциальных участниках и использовано скользящее среднее, чтобы учитывать динамику развития участников проектов. Скользящее среднее (Moving Average, MA) — это один из популярных статистических инструментов анализа временных рядов, часто используемый в экономике, финансах и технике. Оно помогает сгладить колебания данных и выявить основную тенденцию изменения показателей. Расчёт скользящих средних полезен для выявления общих тенденций и сглаживания случайных колебаний данных.

Простое скользящее среднее рассчитывается путем суммирования значений временного ряда за определенный период времени n и деления полученной суммы на количество точек в периоде.

Экспоненциальное скользящее среднее (Exponential Moving Average, ЕМА) придает больший вес последним данным, позволяя быстрее реагировать на изменения цены.

Таким образом, алгоритм расчета итоговой оценки был дополнен, чтобы включались показатели предыдущих периодов. Что позволило учитывать историю изменений оценок участников и формировать итоговый рейтинг с учётом динамики.

Построение прогностической модели

Прогностическое моделирование используется для предсказания будущих событий или поведения объектов на основе исторических данных. Важно понимать, какую именно переменную предстоит прогнозировать и каким периодом охвата ограничиваться.

В рамках исследования были получены исторические данные, необходимые для обучения модели, была разработана нейронная сеть, подготовлены тренировочная выборка для обуче-

ния модели и тестовая выборка для оценки точности построенной модели.

Точность прогноза на тестовом наборе данных оценивалась с помощью метрик среднеквадратичной ошибки и коэффициента детерминации. Эти показатели позволяют оценить степень соответствия прогнозируемых значений фактическим наблюдениям.

Заключение

В рамках дальнейшего проведения исследования предполагается добавить новые критерии, влияющие на прогнозируемую величину, проверить возможность объединения нескольких моделей и попробовать другие алгоритмы машинного обучения. Оптимальная стратегия — провести тестирование нескольких подходов и выбрать тот, который соответствует приоритетам и целям проекта.

Правильно построенная прогностическая модель может значительно повысить эффективность проектов, снизить риски и увеличить прибыль.

Литература

1. Проскурин Д.К., Колыхалова Е.В. Моделирование темпоральных данных на уровне бизнес-логики информационных систем // Современные проблемы информатизации в моделировании и социальных технологиях: сб. трудов под ред. О.Я. Кравец. Воронеж: «Научная книга», 2010. Вып. 15. С. 281-283.
2. Проскурин Д.К., Колыхалова Е.В. Методические основы моделирования темпоральных информационных структур // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2013. № 1(1). С. 87-90.
3. Разработка подсистемы расчета аналитических показателей / Е.В. Колыхалова, С.Л. Подвальный, Д.К. Проскурин, Т.А. Голикова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 1. С. 26-33.
4. Kolykhalova E., Podvalny S., Proskurin D. Basics of Using Temporal Data in the Design of Project Management Information Systems // Taratukhin V., Levchenko A., Kupriyanov Y. (eds) Information Systems and Design. ICID 2022. Communications in Computer and Information Science, vol 1767. Springer, Cham. Pp. 51-60.
5. Мюллер А., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными. М.: Вильямс, 2017. 393 с.

Поступила 26.04.2025; принята к публикации 09.06.2025

Информация об авторах

Колыхалова Евгения Владимировна – начальник отдела автоматизированных информационных систем управления информационных технологий, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(473)207-22-20 доб. 4800, e-mail: evkolihalova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2443-1717>

Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rector@cchgeu.ru

DEVELOPMENT OF A RATING ALGORITHM FOR SELECTING THE PREFERRED CLASS INSTANCE OF AN ANALYTICAL INFORMATION SYSTEM

E.V. Kolykhalova, D.K. Proskurin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article describes methods for preparing a data set containing the values of criteria that affect the selection and rating of project participants. As part of the study, we prepared data sets based on information contained in various information bases of the organization. We defined the criteria to be analyzed, and extracted data, cleaned, and transformed to enable further effective work with the criteria of project participants. At the initial stage, we calculated the weights of the criteria and applied the principal component analysis (PCA). The use of PCA made it possible to effectively reduce the dimensionality of the data while preserving the key structures and relationships between them. To take into account the values of the criteria for past periods, we introduced additional functionality that allows saving historical data and taking into account the dynamics of indicators in calculating the current rating. We constructed the predictive model using machine learning methods, in particular, we used neural networks. However, we plan to subsequently expand the set of machine learning methods used, increase the number of criteria taken into account, and also try to apply the developed methods and algorithms to other data sets

Key words: algorithm development, information system, criteria evaluation, neural networks

References

1. Proskurin D.K., Kolykhalova E.V. "Modeling of temporal data at the level of business logic of information systems", *Modern Problems of Informatization in Modeling and Social Technologies (Sovremennyye problemy informatizatsii v modelirovanii i sotsial'nykh tekhnologiyakh)*, issue 15, Voronezh: Nauchnaya kniga, 2010, pp. 281-283.
2. Proskurin D.K., Kolykhalova E.V. "Methodological foundations of modeling of temporal information structures", *Scientific Bulletin of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta)*, 2013, no. 1 (1), pp. 87-90.
3. Kolykhalova E.V., Podvalny S.L., Proskurin D.K., Golikova T.A. "Development of a subsystem for calculating analytical indicators", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 1, pp. 26-33.
4. Kolykhalova, E., Podvalny, S., Proskurin, D. "Basics of Using Temporal Data in the Design of Project Management Information Systems", *Information Systems and Design. ICID 2022. Communications in Computer and Information Science*, 2023, vol 1767, Springer, Cham., pp. 51-60.
5. Muller A., Guido S. "An introduction to machine learning using Python. A Guide for data Scientists", Moscow: Williams, 2017, 393 p.

Submitted 26.04.2025; revised 09.06.2025

Information about the authors

Evgeniya V. Kolykhalova, Head of the Department of Automated Information Systems for Information Technology Management, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473) 207-22-20 ext. 4800, e-mail: evkolihalova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2443-171>

Dmitriy K. Proskurin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rector@cchgeu.ru

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ В МОДЕЛИРОВАНИИ УРОЖАЙНОСТИ

Я.М. Иваньо, Е.С. Климов

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
п. Молодежный, Иркутский район, Россия

Аннотация: проведено исследование влияния засухи на деятельность сельскохозяйственных товаропроизводителей на основе анализа временных рядов урожайности сельскохозяйственных культур и метеорологических факторов. С увеличением частоты засух в условиях изменения климата становится важной разработка улучшенных методов моделирования этого явления. Одним из индикаторов засухи является урожайность сельскохозяйственных культур. Современные модели прогнозирования урожайности используют весь вегетационный период при формировании метеорологических факторов, что может привести к снижению точности. Исследуются подходы к улучшению моделей прогнозирования урожайности, предлагается метод выбора оптимального временного периода с наибольшим влиянием метеорологических факторов на урожайность сельскохозяйственных культур. Такой подход аксиоматически предполагает разное влияние внешних факторов на разных интервалах вегетационного периода. При решении задачи использованы линейные модели машинного обучения и нейронная сеть Temporal Fusion Transformer. Для определения оптимального временного периода предложен алгоритм, который позволяет улучшить качество данных для обучения модели. Алгоритм использует свойство интерпретируемости бустингов над деревьями решений для оценки влияния временного периода на точность модели. Предложенный подход может быть применен для прогнозирования и мониторинга урожайности сельскохозяйственных культур как индикатора засухи

Ключевые слова: моделирование, машинное обучение, прогнозирование, временные ряды, факторы, урожайность сельскохозяйственных культур

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-21-00502

Введение

Засуха представляет собой одно из наиболее разрушительных природных явлений, оказывающее влияние на множество сфер человеческой деятельности, включая сельское хозяйство, водоснабжение и сохранение биоразнообразия [1]. При участившихся засухах в условиях изменения климата [2] возрастает необходимость разработки точных и эффективных методов моделирования этого явления. Моделирование засух не только способствует глубокому пониманию их природы, но и предоставляет важные данные для принятия обоснованных решений по планированию использования ресурсов и минимизации ущерба [3].

Одними из основных индикаторов засухи являются временные ряды урожайности сельскохозяйственных культур [4], поэтому прогноз этой характеристики тесно связан с прогнозом засух.

В работе проводится исследование подходов к улучшению качества моделей прогнозирования урожайности с точки зрения выбора оптимального периода для обоснования временных признаков.

Таким образом, целью исследования является построение модели многолетнего прогнозирования урожайности различных сельскохозяйственных культур с выявлением интервалов наибольшего влияния метеорологических факторов на результирующий признак, используя машинное обучение и нейронные сети.

Материалы и методы

В работе [5] рассмотрены и применены алгоритмы машинного обучения и нейронных сетей в задаче прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. Авторы исследования использовали линейные модели машинного обучения и нейронные сети на основе зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от суточных температур воздуха и осадков за вегетационный период. Наилучший результат получен с помощью нейронной сети Temporal Fusion Transformer [6], базирующейся на трансформерной архитектуре, на примере прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в Иркутском районе. В данной работе подход, предложенный в [5], предлагается модифицировать, используя алгоритм выбора оптималь-

ного временного периода для расчета агрегатов метеорологических признаков.

Для нахождения некоторого интервала вегетационного периода, в течение которого наблюдается наибольшее влияние метеорологических факторов на урожайность сельскохозяйственной культуры, применена модель бустинга над деревьями решений CatBoost [7], которая работает с сильно коррелирующими переменными, а результат моделирования хорошо интерпретируем. Для уточнения выбора оптимального периода дополнительно использован метод линейной регрессии [8].

Данные для обучения моделей представляют собой статистику по урожайности сельскохозяйственных культур в Иркутском районе с 1997 по 2017 год и сведения о суточных осадках и температурах воздуха в течение теплого сезона. Оценка качества выбранного временного интервала для многолетнего прогнозирования апробирована на данных об урожайности пшеницы, ячменя, овса, картофеля, капусты и свёклы.

В качестве целевых метрик для оценки точности результатов моделирования используются следующие показатели: средняя абсолютная погрешность (MAE), средняя квадратическая погрешность (MSE) [9], симметричная средняя относительная погрешность (sMAPE) [10]. Ретроспективный прогноз осуществлен на отложенной выборке, начиная с 2013 и завершая 2017 годом.

Основные результаты

Прогнозирование засухи тесно связано с прогнозированием урожайности сельскохозяйственных культур, которая является одним из ключевых индикаторов засушливых условий. Эти две характеристики обычно имеют тесную корреляцию и могут быть использованы в качестве индикаторов погодных аномалий [1]. Поэтому анализ временных рядов урожайности может служить важным элементом при прогнозировании и мониторинге засухи.

Оригинальная модель [5] прогноза урожайности построена на агрегатах метеорологических факторов за весь вегетационный период с апреля по сентябрь. В качестве метеорологических факторов использованы суточные температуры воздуха и суммы осадков. Из этих факторов выделены температуры воздуха в значительно большей степени коррелирующие с урожайностью сельскохозяйственных культур по сравнению с осадками.

Такой подход к построению модели не оптимален, так как на разных интервалах вегетационного периода влияние метеорологических факторов на урожайность разное. Отсюда следует, что для улучшения модели прогнозирования урожайности необходимо определить интервал (интервалы) вегетационного периода, который (которые) в наибольшей степени влияет (влияют) на характеристику биопродуктивности.

Для определения оптимального временного интервала предлагается следующий алгоритм:

1) создается база данных, которая будет хранить информацию о влиянии конкретных суток в году на урожайность;

2) фиксируется временной интервал и шаг, на который этот интервал будет смещаться вперед;

3) весь вегетационный период разбивается на отрезки, параметры которых определены в предыдущем пункте;

4) для каждого полученного интервала рассчитываются усредненные значения метеорологических факторов;

5) полученные расчетные значения в предыдущем пункте рассматриваются как признаки для обучения линейной модели машинного обучения;

6) обучается модель, проверяются метрики ее качества, рассчитывается значимость признаков;

7) так как признаками являются временные интервалы, то для каждых суток из интервала прибавляется значение их значимости по влиянию метеорологических факторов на урожайность в базе данных;

8) пункты 2-7 повторяются для следующих формирований интервалов 5, 7, 10, 14, 21 (сут) с шагами 3, 5, 7, 10 (сут);

9) в результате множества экспериментов база данных обогащается с учетом влияния метеорологических факторов каждых суток на урожайность;

10) из наиболее значимых суток по воздействию факторов составляется интервал, который характеризует наибольшее влияние на урожайность.

Стоит отметить, что архитектура выбранной модели машинного обучения позволяет оценить значимость метеорологических факторов без использования дополнительных инструментов, влияющих на урожайность по количеству обращений к факторам при обучении модели [10].

Итоговая таблица с влиянием факторов в определенные сутки вегетационного периода на урожайность выглядит следующим образом (табл. 1).

Таблица 1
Даты наибольшего влияния метеорологических факторов на урожайность пшеницы в Иркутском районе

Дата	Среднее количество обращений к интервалу, содержащему дату
22.05	400
21.05	393
10.05	370
11.05	367
7.05	367
8.05	361
23.05	359
9.05	357
13.05	353
24.05	349

На основе табл. 1 определены временные интервалы с начальными и конечными датами, оказывающие наибольшее влияние на урожайность пшеницы: [20.05, 26.05], [8.05, 13.05], [5.05, 15.05], [18.05, 28.05], [15.05, 24.05]. Оценка качества выбранных временных промежутков проведена с помощью линейной регрессии для сравнения с базовой моделью, построенной на агрегатах по полному вегетационному периоду.

Ниже приведены результаты проверки временных периодов (табл. 2).

Таблица 2
Сравнение моделей, построенных на разных временных промежутках, согласно средней абсолютной и относительной погрешности

Модели прогнозирования урожая пшеницы	MAE, ц/га	sMAPE, %
Весь вегетационный период	5,06	29,3
20 - 26 мая	5,35	30,9
8 - 13 мая	4,87	28,2
5 - 15 мая	5,21	30,3
18 - 28 мая	4,94	28,8
15 - 24 мая	5,34	31,2
1 - 15 мая	5,15	29,9
4 - 18 мая	5,09	29,6
8 - 20 мая	4,99	28,9
12 - 26 мая	5,22	30,4
Все периоды	5,34	31,1

Таким образом, для прогнозирования пшеницы получена оптимальная комбинация временных интервалов: 8 - 13 мая, 8 - 20 мая, 18 - 28 мая. Аналогичным образом осуществлялся расчет оптимальных интервалов влияния температуры воздуха для других культур: овса, ячменя, капусты, картофеля и свеклы. В итоговых моделях используется только средняя суточная температура воздуха, так как этот метеорологический фактор более точно отражает его влияние на урожайность согласно метрикам.

На основании выделенных интервалов (табл. 3) построены регрессионные уравнения зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от средней температуры воздуха в их пределах. В частности, для урожайности пшеницы такой интервал соответствует 18-28 мая.

Приведем расчетные формулы зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от усредненных температур воздуха на выделенных интервалах:

$$y_t^{\text{пшеница}} = 15.7 - 0.75T, \quad (1)$$

$$y_t^{\text{ячмень}} = 15.87 + 1.17T, \quad (2)$$

$$y_t^{\text{овес}} = 15.67 - 0.1T, \quad (3)$$

$$y_t^{\text{свекла}} = 174.6 - 8.3T, \quad (4)$$

$$y_t^{\text{капуста}} = 234.7 - 13.3T, \quad (5)$$

$$y_t^{\text{картофель}} = 162.2 - 5.1T, \quad (6)$$

где y_t — урожайность сельскохозяйственной культуры, T — средняя температура в соответствующем оптимальном интервале.

Таблица 3
Точность уравнений регрессии зависимости урожайности от усредненной температуры воздуха выделенного интервала

Сельскохозяйственная культура	Период	MAE, ц/га	sMAPE, %
Пшеница	18-28 мая	4,94	28,8
Ячмень	1-12 мая	4,06	30,2
Овес	1-11 мая	2,81	20,6
Капуста	4-15 мая	49,8	17,1
Картофель	17-28 мая	11,76	7,7
Свекла	18-30 мая	13,9	7,4

Помимо приведенных уравнений регрессии с учетом одного интервала проведены расчеты для комбинаций нескольких интервалов, но улучшения метрик точности приведенных моделей не было обнаружено.

Полученная модель влияния средней температуры воздуха в пределах совокупности оптимальных интервалов на урожайность сравнивалась с результатами зависимости урожайности от температуры за вегетационный период [5] с помощью нейронной сети TemporalFusionTransformer [6]. В табл. 4 приведены результаты сравнительного анализа на основе абсолютной и относительной погрешности для урожайности пшеницы ячменя, овса, картофеля, капусты и свёклы.

Для моделей изменчивости урожайности ячменя, картофеля и свеклы подбор оптимального временного периода привел к улучшению качества. Для моделей пшеницы, овса и капусты качество незначительно ухудшилось.

Исходя из полученных метрик, можно сделать вывод, что для модели со сложной архитектурой и большим количеством параметров, вроде нейронной сети, на трансформерной архитектуре определение и использование оптимальных интервалов существенно не улучшает результаты прогнозирования.

Таблица 4

Сравнение метрик нейронных сетей, построенных на оптимальных интервалах и вегетационном периоде

Сельскохозяйственная культура	Нейронная сеть, построенная на оптимальных интервалах		Нейронная сеть, построенная на вегетационном периоде	
	MAE, ц/га	sMAPE, %	MAE, ц/га	sMAPE, %
Пшеница	3,39	19,51	3,33	19,15
Ячмень	3,87	27,25	4,17	28,86
Овес	2,76	19,03	2,65	18,39
Картофель	12,78	8,32	16,04	10,21
Капуста	50,3	18,12	49,20	17,72
Свекла	13,5	6,81	16,14	8,08

Однако связи между урожайностью и метеорологическими факторами в начальный период вегетации позволяют с указанной точностью спрогнозировать характеристику биопродуктивности на конец вегетационного периода, что имеет значение для решения управленческих задач.

Отметим, что для оценки качества моделей проведен ретроспективный прогноз на 5 лет на

отложенной выборке с 2013 по 2017 год. Также ретроспективный прогноз выполнен с упреждением 3 и 7 лет на выборках с 2015 по 2017 год и с 2011 по 2017 год соответственно. Ниже приведена табл. 5 с метриками итоговых моделей на различных отложенных выборках.

Таблица 5

Сравнение моделей для разных периодов прогнозирования (3, 5, 7 лет)

Культура	Трехлетний прогноз		Пятилетний прогноз		Семилетний прогноз	
	MAE, ц/га	sMAPE, %	MAE, ц/га	sMAPE, %	MAE, ц/га	sMAPE, %
Пшеница	4,76	27,68	3,39	19,51	2,76	15,94
Ячмень	4,76	36,01	3,87	27,25	3,53	24,05
Овес	3,36	24,81	2,76	19,03	1,92	13,35
Картофель	10,39	6,84	12,78	8,32	17,31	10,80
Капуста	50,21	16,05	50,3	18,12	44,14	16,01
Свекла	16,35	8,44	13,5	6,81	24,23	13,16

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что нейронная сеть лучше справляется с прогнозами на большой срок, в то время как классические модели лучше работают на непродолжительных периодах.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что существует необходимость поиска оптимального временного периода для определения влияния метеорологических факторов на урожайность сельскохозяйственных культур, поскольку воздействие факторов на биопродуктивность в течение вегетационного периода неравномерно.

Предложенный алгоритм для определения оптимального временного интервала с наибольшим влиянием метеорологических факторов на урожайность с помощью модели бустинга над деревьями решений показал состоятельность для построения уравнений линейной регрессии, но результаты оказались меньшей точности по сравнению с применением нейронных сетей.

Для улучшения результатов моделирования в дальнейшем предлагается строить модели не только на агрегатах метеорологических данных, но и на дополнительных признаках. При этом для решения задачи прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур могут быть использованы другие методы расчета важности признака, например, SHAP.

Выводы

Доказано, что выбор временного периода для расчета агрегатов метеорологических факторов существенно влияет на точность прогнозов модели. Предложен алгоритм определения оптимального временного периода, который максимизирует прогностическую способность модели для заданной сельскохозяйственной культуры. Есть перспективы интеграции алгоритма в ИТ-системы, работающие в области сельского хозяйства, такие как «АгроСигнал», «SmartAGRO», «Точка роста».

Литература

1. Журавлева Е.В., Фурсов С.В. Засуха как один из факторов риска в экономике растениеводства Российской Федерации // Достижения науки и техники АПК. 2016. № 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zasuha-kak-odin-iz-faktorov-riska-v-ekonomike-rastenievodstva-rossiyskoy-federatsii> (дата обращения: 02.11.2024).
2. Павлова В.Н., Карачёнова А.А. Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991–2020 гг. // Метеорология и гидрология. 2023. № 9. С. 29-42.
3. Математические и цифровые технологии оптимизации производства продовольственной продукции / Я.М. Иванько [и др.]. Молодежный: Иркутский государст-

венный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2021. 219 с.

4. Хрипунов А.И., Федотов А.А., Лиходиевская С.А. Влияние засух на урожайность озимой пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-zasuh-na-urozhaynost-ozimoy-psheniцы> (дата обращения: 02.04.2024).

5. Климов Е.С., Иванько Я.М. Машинное обучение в решении задач прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // Комплексное развитие территорий в условиях цифровой трансформации: материалы науч.-практ. конф., посвященной 90-летию ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2024. С. 59-65.

6. Temporal Fusion Transformers for Interpretable Multi-horizon Time Series Forecasting / B. Lim, S.O. Arik, N. Loeff, T. Pfister // arXiv.org. 2019. Дата обновления: 19.12.2019. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.09363> (дата обращения: 25.02.2024).

7. CatBoost: unbiased boosting with categorical features / L. Prokhorenkova, G. Guse, A. Vorobev, A.V. Dorogush, A. Gulin // arXiv.org. 2019. Дата обновления: 20.01.2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1706.09516> (дата обращения: 26.03.2024).

8. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессия. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.

9. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд. М., 1962. 328 с.

10. Tofallis C. A Better Measure of Relative Prediction Accuracy for Model Selection and Model Estimation // Journal of the Operational Research Society. 2015. no. 66. Pp. 1352-1362.

Поступила 18.02.2025; принята к публикации 30.05.2025

Информация об авторах

Иванько Ярослав Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского (664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский район, п. Молодежный, здание 1/1), тел.: +7 (3952) 23-74-91, e-mail: iymex@ Rambler.ru

Климов Егор Сергеевич – аспирант кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского (664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, здание 1/1), тел. +7 (3952) 23-74-91, e-mail: 1c@irsau.ru

ALGORITHM FOR DETERMINING THE OPTIMAL INTERVAL OF INFLUENCE OF FACTORS IN CROP YIELD MODELING

Ya.M. Ivanyo, E.S. Klimov

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,
Molodezhny, Irkutsk District, Russia

Abstract: we carried out the impact of drought on the activities of agricultural producers on the basis of an analysis of the time series of crop crops and meteorological factors. With an increase in the frequency of droughts in conditions of climate change, it becomes important to develop improved methods of modeling this phenomenon. One of the drought indicators is the yield of agricultural crops. Modern modeling models use the entire growing season in the formation of meteorological factors, which can lead to a decrease in accuracy. The authors explore the approaches to improving productivity predicting models, offering the method of choosing the optimal time period with the greatest influence of meteorological factors on agricultural crops. This approach axiomatically implies a different influence of external factors on different intervals of the growing season. To solve the problem, we used linear models of machine learning and the neural network Temporal Fusion Transformer. To determine the optimal time period, we proposed an algorithm, which allows you to improve the quality of data for training in the model. The algorithm uses the property of the interpretability of boostings over decisions trees to assess the effect of the

time period on the accuracy of the model. The proposed approach can be used to predict and monitor the yield of agricultural crops as an indicator of drought

Key words: modeling, machine learning, forecasting, time series, factors, crop yield

Acknowledgment: this work was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project no. 24-21-00502

References

1. Zhuravleva E.V., Fursov S.V. "Drought as one of the risk factors in the economy of crop production in the Russian Federation", *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex (Dostizheniya nauki i tekhniki APK)*, 2016, no. 9, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zasuha-kak-odin-iz-faktorov-riska-v-ekonomike-rastenievodstva-rossiyskoy-federatsii> (date of access: 02.11.2024).
2. Pavlova V.N., Karachenkova A.A. "Changes in agroclimatic resources of grain-producing regions of Russia and productivity of grain crops in the new climatic period 1991–2020", *Meteorology and Hydrology*, 2023, no. 9, pp. 29-42.
3. Ivan'o Ya.M. et al. "Mathematical and digital technologies for optimization of food production" ("Matematicheskie i tsifrovye tekhnologii optimizatsii proizvodstva prodovol'stvennoy produktsii"), Molodezhny: Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, 2021, 219 p.
4. Khripunov A.I., Fedotov A.A., Likhodievskaya S.A. "The impact of droughts on the yield of winter wheat", *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex (Dostizheniya nauki i tekhniki APK)*, 2014, no. 11, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-zasuh-na-urozhaynost-ozii> (date of access: 02.04.2024).
5. Klimov E.S., Ivan'o Ya.M. "Machine learning in solving problems of forecasting crop yields", *Proc. of the Sci. and Prac. Conf. Dedicated to the 90th Anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk State Agrarian University: Integrated Development of Territories in the Context of Digital Transformation (Kompleksnoe razvitiye territoriy v usloviyakh tsifrovoy transformatsii)*, Molodezhny, March 13-14, 2024, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, pp. 59-65.
6. Lim B., Arik S.O., Loeff N., Pfister T. "Temporal Fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting", arXiv.org, 2019, available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.09363> (date of access: 25.02.2024).
7. Prokhorenkova L., Guse G., Vorobev A., Dorogush A.V., Gulin A. "CatBoost: unbiased boosting with categorical features", arXiv.org, 2019, available at: <https://arxiv.org/abs/1706.09516> date of access: 26.03.2024).
8. Demidenko E.Z. "Linear and nonlinear regression" ("Lineynaya i nelineynaya regressiya"), Moscow: Finance and statistics, 1981, 302 p.
9. Linnik Yu.V. "The method of least squares and the basics of the mathematical-statistical theory of observation processing" ("Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniyy"), 1962, 328 p.
10. Tofallis C. "A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation", *Journal of the Operational Research Society*, 2015, no. 66, pp. 1352-1362.

Submitted 18.02.2025; revised 30.05.2025

Information about the authors

Yaroslav M. Ivanyo, Dr. Sc. (Technical), Professor, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky (1/1 Molodyozhny 664038, Irkutsk Region, Russia), tel.: +7(3952)237491, e-mail: iymex@rambler.ru
Egor S. Klimov, graduate student, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky (1/1 Molodyozhny 664038, Irkutsk Region, Russia), tel.: +7(3952)237491, e-mail: 1c@irsau.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНОГО ВРЕМЕННОГО КОДИРОВАНИЯ И МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

С.Л. Подвальный¹, Н.В. Саввин^{1,2}, Д.Н. Васенин³, А.А. Шахова⁴

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
г. Москва, Россия

³Университет Брешиа, г. Брешиа, Италия

⁴Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: выполнено эмпирическое сравнение официальных краткосрочных прогнозов потребления электроэнергии, предоставляемых оператором торговой системы (АТС), с прогнозами, полученными с применением современных методов машинного обучения. Рассмотрены различные архитектуры нейронных сетей: Long Short-Term Memory (LSTM), Bidirectional LSTM (Bi-LSTM), а также их гибридные комбинации со сверточными нейронными сетями (CNN-LSTM и CNN-Bi-LSTM). Кроме того, использована модель градиентного бустинга Extreme Gradient Boosting (XGBoost). Анализ проведён на реальных исторических данных электропотребления, охватывающих период с 2011 года по июнь 2016 года, для двух ключевых узлов сети — РАМУРЕНЕ и РЕВРАОБЛ. Для количественной оценки точности применены стандартные метрики: средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE), среднеквадратичная ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R^2) и взвешенная средняя абсолютная процентная ошибка (WMAPE). Полученные результаты показывают значительное улучшение точности прогнозирования до 30 % по сравнению с официальными данными АТС, что свидетельствует о высокой эффективности и перспективности выбранных моделей машинного обучения для задачи краткосрочного прогнозирования электроэнергии в современных энергосистемах

Ключевые слова: прогнозирование временных рядов, прогнозирование нагрузки, энергорынок, АТС, машинное обучение, LSTM, BiLSTM, XGBoost

Введение

Точное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии является важнейшей задачей в электроэнергетике, обеспечивающей надёжную работу энергосистем и эффективное планирование закупок, генерации и распределения ресурсов [1]. В странах СНГ краткосрочный прогноз, как правило, осуществляется с упреждением на сутки и формирует основу для расчёта режимов работы энергосистем, оценки их надёжности и экономичности [2]. Операторы торговой системы (АТС) предоставляют официальные прогнозы, которые используются энергокомпаниями при планировании, однако эти прогнозы не всегда обеспечивают необходимую точность, особенно в условиях высоко нестабильной и нелинейной нагрузки. Основной трудностью является противоречие между стремлением увеличить глубину адаптации и необходимостью обеспечить устойчивость во всём диапазоне параметров. Современные исследования в области интеллекту-

ального анализа данных и машинного обучения предлагают альтернативные подходы к прогнозированию. Модели на основе рекуррентных нейросетей (в частности, LSTM и BiLSTM), а также регрессионные модели экстремального градиентного бустинга (XGBRegressor), ранее зарекомендовавшей себя как эффективный инструмент прогнозирования временных рядов [3], способны выявлять сложные закономерности и временные зависимости в данных, превосходя по точности традиционные методы [4, 5, 6]. С учётом сформулированной целевой функции и ограничений, актуальной задачей становится разработка соответствующих эвристик. Кроме того, разработка расширенных признаков пространств, включающих погодные параметры, календарные метаданные и производные признаки (например, скорость изменения нагрузки), становится ключевым направлением в построении эффективных моделей прогноза [7]. Настоящее исследование направлено на оценку потенциала моделей машинного обучения в контексте краткосрочного прогнозирования электроэнергии на российском энергорынке. Работа опирается на открытые исторические данные АТС за период 2011–

2016 годов и демонстрирует значительное улучшение точности прогнозов при использовании гибридных архитектур и обоснованного отбора признаков. Кроме того, в работе рассматривается возможность реального применения моделей, способных функционировать в условиях ограниченности входных данных [8].

Методология

Исследование основано на сравнении официального прогноза объемов потребления электроэнергии (колонка VC_ППП) с прогнозами, сформированными с использованием различных моделей машинного обучения. В качестве фактических значений использовалась колонка VC_факт, отражающая реальное почасовое потребление.

Подготовка данных

Для анализа использовались открытые данные от оператора торговой системы (АТС), охватывающие период с 2011 по 2016 годы. Данные представляют собой почасовые временные ряды объемов потребления электроэнергии на двух точках генерации:

1. **ОАО «ДЭК». ГТП: PAMURENE** — регион: **Амурская область**;
2. **ОАО «ДЭК». ГТП: PEVRAOBL** — регион: **Еврейская автономная область**.

Каждая запись содержит:

1. Дату и час (в формате YYYY-MM-DD HH),
2. Фактический объем потребления (VC_факт),
3. Прогнозируемый объем потребления (VC_ППП), заявленный гарантирующим поставщиком (ГП).

Данные отличаются по динамике и сезонности. Так, площадка PAMURENE характеризуется более выраженными скачками нагрузки и большей вариативностью, что делает задачу прогнозирования более сложной. Площадка PEVRAOBL, напротив, демонстрирует более сглаженные и регулярные суточные циклы.

Исходный временной ряд потребления обозначим как:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_T\}, p_t \in \mathbb{R} \quad (1)$$

Архитектуры используемых моделей

Для прогнозирования были применены следующие архитектуры:

1. XGBoost — градиентный бустинг на решающих деревьях;
2. LSTM — рекуррентная нейросеть с механизмом долгосрочной памяти;
3. BiLSTM — модификация LSTM, учитывающая двунаправленные зависимости;
4. CNN-LSTM и CNN-BiLSTM — гибридные архитектуры, сочетающие извлечение локальных признаков и обучение временным зависимостям.

Параметры моделей подбирались с использованием сеточного поиска и основаны на апробированных конфигурациях из литературы [9].

Стратегия прогнозирования

В рамках данного исследования были сконструированы и протестированы четыре архитектуры нейросетевых моделей, предназначенных для прогнозирования временных рядов. В качестве основной модели использовалась двунаправленная сеть на основе LSTM (Bi-LSTM), включающая три последовательно соединённых слоя с количеством нейронов 30, 20 и 10. Для первого слоя применялась функция активации softplus, а для последующих — ReLU. Также реализована однонаправленная LSTM-сеть идентичной структуры, что позволило провести сравнение с точки зрения эффективности двунаправленного подхода. Для моделирования временных и пространственных закономерностей были предложены гибридные архитектуры CNN-LSTM и CNN-Bi-LSTM. Эти модели содержат сверточные слои для извлечения локальных признаков с LSTM-компонентами, способными улавливать временные зависимости. При разработке архитектур учитывались требования к быстродействию, поскольку улучшение скорости отклика имеет большое значение для тестовой линии, применяющей электронные нагрузки. Все архитектуры оснащены регуляризирующими механизмами: рекуррентный дроп-аут (0.2) и L2-регуляризация на выходном плотном слое ($\lambda=0.2$).

Гиперпараметры моделей были определены на основе предварительных экспериментов. В сверточных слоях использовались 128 и 256 фильтров с размером ядра 1. Длина входной последовательности (лаг) составила 4 временных шага, что позволяет учитывать краткосрочную динамику. Параметр points_per_call был установлен равным 12, то есть за один прогноз модели предсказывается 12 значений. Модели обучались с использованием оптимизатора Adam, функцией потерь MSE и дополни-

тельной метрикой MAE. Для предотвращения переобучения число эпох ограничено пятью. Горизонт прогнозирования составил 288 временных точек, что эквивалентно одному дню при 5-минутной дискретизации.

Этап обучения включал нормализацию исходных данных и формирование обучающих и тестовых выборок. Обучающие последовательности преобразовывались в скользящие окна длины lag с соответствующими целями размером $points_per_call$. Обучение выполнялось через метод fit , при этом применялись обратные вызовы (callbacks) для сохранения наилучших параметров. Особое внимание уделялось работе с многомерными временными рядами: обеспечивалась синхронизация всех признаков.

Прогнозирование осуществлялось через пошаговый алгоритм $make_predictions$. Он последовательно генерирует блоки прогнозов длиной $points_per_call$, обновляет входное окно на основе предсказанных значений и повторяет процесс до достижения целевого горизонта. На каждом этапе входное окно преобразуется в формат тензора и подается в модель, после чего обновляется с учетом новых прогнозов. Такой подход позволяет эффективно совмещать краткосрочное прогнозирование с возможностью генерации длительных последовательностей, сохраняя временные зависимости. Метод показал высокую применимость в задачах прогнозирования энергопотребления, где важно учитывать как краткосрочные флуктуации, так и устойчивые сезонные тренды. Для оценки точности использовалась скользящая стратегия тестирования, при которой модель обучается на всем доступном историческом интервале до текущего дня, а прогноз формируется на следующий день.

Прогноз формировался на следующие 168 часов:

$$\hat{P}_{t+1}, \hat{P}_{t+2}, \dots, \hat{P}_{t+H} = f(X_t), \quad (2)$$

где X_t — набор признаков за момент времени t , а $f(\cdot)$ — обученная модель.

Применялась стратегия **скользящего окна**:

$$Train_t = \{(X_i, P_i) \mid i \in [t - W, t]\}, \hat{P}_{t+1} = f(Train_t), \quad (3)$$

где W — размер обучающего окна.

Такой подход имитирует реальные условия использования моделей в операционной среде, в том числе при отсутствии заранее известной валидационной выборки. Подобная стратегия обоснована в работе [7], где подчер-

кивается практическая значимость прогноза «только по прошлому».

Векторно-временное кодирование

Метод векторного-временного кодирования представляет собой комплексное преобразование временных меток в многомерное признаковое пространство, объединяющее различные подходы к представлению временных данных.

$$\begin{aligned} ["YYYY - MM - DD hh:mm:ss"] \rightarrow & \\ ["year", "month", "day", "week", & \\ "day_of_week", "hour", "minute", & \\ second, "hour_sin", "hour_cos", & \\ "day_of_week_cos", "day_of_week_sin", & \\ "week_sin", "week_cos", & \\ "month_sin", "month_cos", & \\ "part_of_day", "is_night", "is_weekend", & \\ "day_of_year", "is_working_hours", & \\ season, "season_sin", "season_cos", & \\ quarter, "quarter_sin", "quarter_cos", & \\ "peak_zone"] & \end{aligned} \quad (4)$$

Основу метода составляет декомпозиция временной метки на набор взаимодополняющих признаков, включающих как базовые временные компоненты (год, месяц, день, час, минута, секунда), так и производные календарные атрибуты (неделя года, день недели, квартал). Особое внимание уделено корректному представлению циклических характеристик, механизм которого подробно описан в формуле (1).

В данной работе применяется модифицированный Time2Vec-подход, ограниченный конкретным набором признаков, релевантных для задачи прогнозирования электроэнергии. Используются следующие компоненты временной метки:

1. Час, минута (циклическое кодирование через \sin/\cos),
2. День недели (one-hot),
3. Части суток (утро, день, вечер, ночь — категориально),
4. Бинарные признаки: выходной день, рабочее время.

Циклические признаки кодируются по формулам (5) и (6):

$$\sin_feature = \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{T}\right), \quad (5)$$

$$\cos_feature = \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{T}\right), \quad (6)$$

где x — значение временной компоненты (например, час), а T — период (например, 24 для часов).

Такое кодирование позволяет модели лучше интерпретировать циклические свойства времени и способствует извлечению более стабильных закономерностей в данных.

Стратегия отбора признаков

В работе использована комбинированная процедура отбора признаков:

1. **Distance Correlation** — позволяет выявить как линейные, так и нелинейные/немонотонные зависимости между признаками:

$$dCor(X, Y) = \frac{dCor(X, Y)}{\sqrt{dCor(X, X) \cdot dCor(Y, Y)}}. \quad (7)$$

2. **SFS (Sequential Feature Selection)** — пошаговая проверка влияния отдельных признаков на точность модели.

Это позволило оценить вклад различных типов признаков (временных, погодных, производных) в точность прогнозирования и избежать переобучения, не увеличивая избыточно сложность модели.

Результаты

Оценка эффективности прогнозных моделей проводилась на двух тестовых площадках: ОАО «ДЭК» ГТП РАМURENE и ОАО «ДЭК»

ГТП PEVRAOBL. В качестве базового прогноза рассматривались значения VC_ППП, опубликованные на сайте АТС, представляющие объем планового почасового потребления.

Для оценки точности прогнозирования использовались следующие метрики: средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE), которая традиционно применяется для оценки качества прогнозов в прикладных задачах [10], коэффициент детерминации (R^2), среднеквадратичная ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE) и взвешенная MAPE (WMAPE).

ОАО «ДЭК». ГТП: РАМURENE — регион: Амурская область:

Базовый прогноз, сформированный с использованием АТС-модели, показал значения ошибок MAPE = 6.39% и $R^2 = 0.50$. Наиболее точной моделью оказалась XGBoost, достигшая MAPE = 4.45% и $R^2 = 0.74$. Модель LSTM продемонстрировала сопоставимые результаты (MAPE = 4.9%, $R^2 = 0.69$). Остальные архитектуры — Bi-LSTM, CNN-LSTM и CNN-Bi-LSTM — также превзошли АТС-прогноз, хотя и с меньшими улучшениями. Визуальное сравнение прогнозов всех моделей представлено на рис. 1. Значения метрик для каждой модели приведены в табл. 1, а относительное улучшение точности по сравнению с базовым прогнозом отражено в табл. 2.

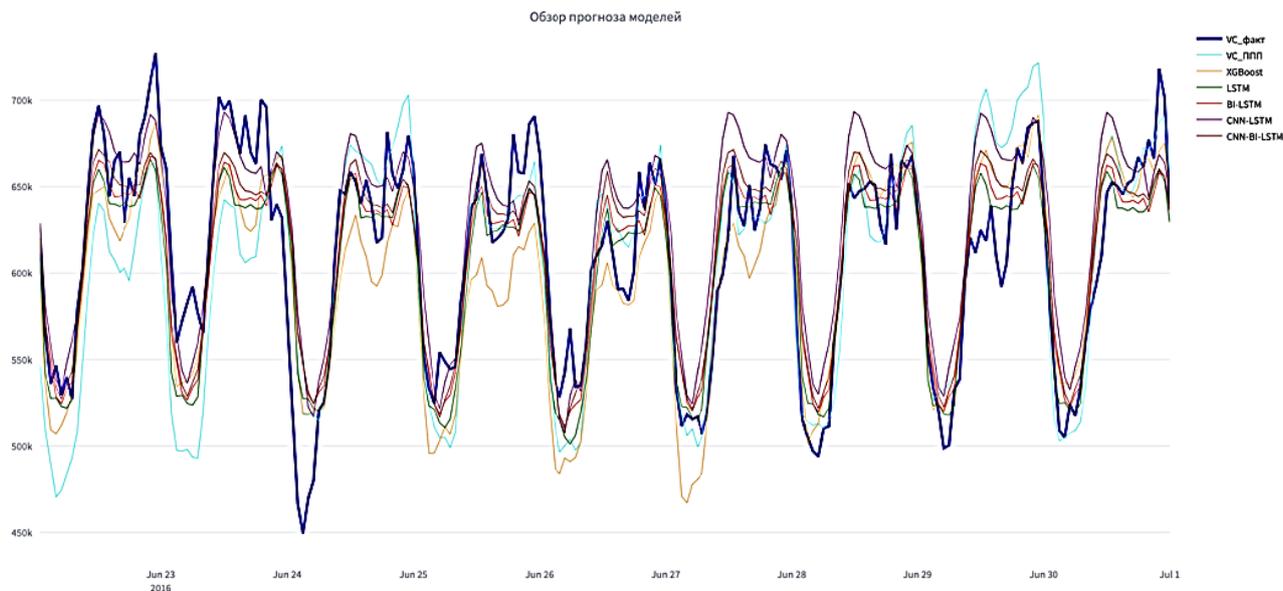


Рис. 1. Краткосрочное прогнозирование нагрузки на недельный горизонт на примере Амурской области

Таблица 1

Значения метрик для каждой модели для «ДЭК». ГТП: PAMURENE

Прогнозирование	MAPE	R ²	RMSE	MAE	WMAPE
VC_ППП	6.39	0.5	47323.93	38800.6	6.35
XGBoost	4.45	0.74	34020.61	27166.74	4.45
LSTM	4.9	0.69	37492.69	29787.41	4.87
Bi-LSTM	5.11	0.68	38280.12	30662.28	5.02
CNN- LSTM	6.09	0.58	43613.14	35842.66	5.87
CNN- Bi-LSTM	5.32	0.66	39270.36	31692.66	5.19

Таблица 2

Относительное улучшение точности по сравнению с базовым прогнозом для «ДЭК».

ГТП: PAMURENE

Прогнозирование	MAPE	R ²	RMSE	MAE	WMAPE
XGBoost	30.36%	48.0%	28.11%	29.98%	29.92%
LSTM	23.32%	38.0%	20.77%	23.23%	23.31%
Bi-LSTM	20.03%	36.0%	19.11%	20.97%	20.94%
CNN- LSTM	4.69%	16.0%	7.84%	7.62%	7.56%
CNN- Bi-LSTM	16.74%	32.0%	17.02%	18.32%	18.27%

На данных ОАО «ДЭК». ГТП: PEVRAOBL — регион: Еврейская автономная область:

Прогноз, выполненный с использованием АТС-модели, показал MAPE = 8.57% и R² = 0.34. Наилучший результат продемонстрировала модель CNN-LSTM, достигнув значений MAPE = 7.45% и R² = 0.49. Модель XGBoost

также показала улучшение по сравнению с базовой: MAPE = 7.7%, R² = 0.44. Другие архитектуры обеспечили прирост точности, но менее значительный. Подробные сравнительные данные представлены на рис. 2, значения метрик — в табл. 3, а относительные улучшения — в табл. 4.

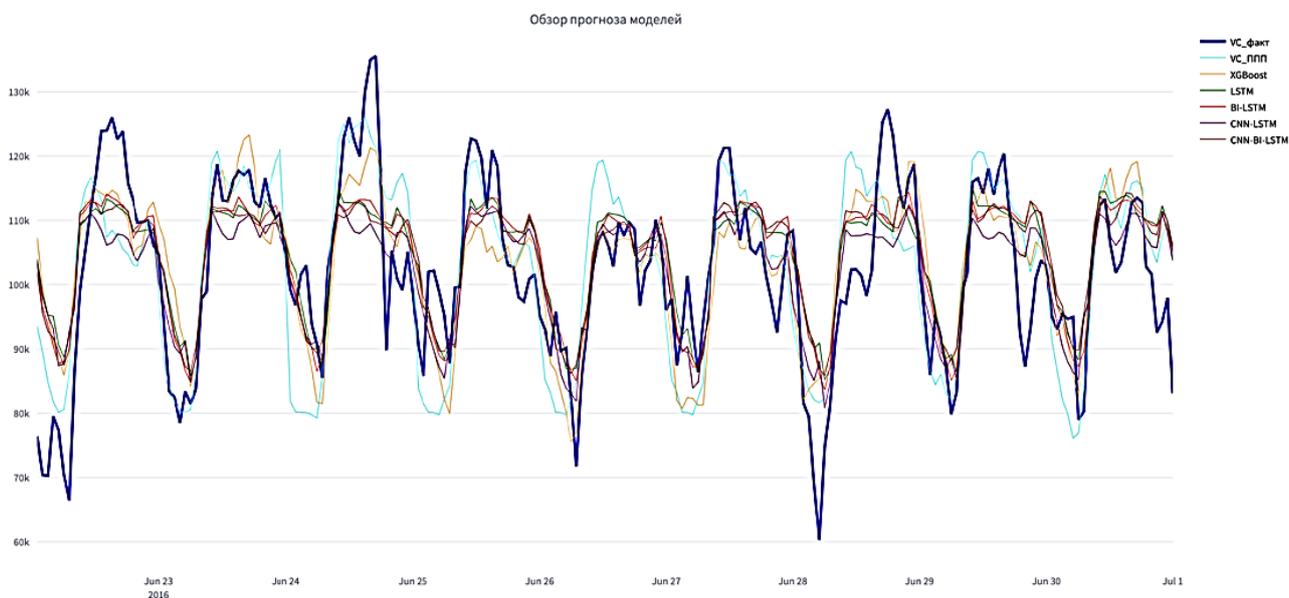


Рис. 2. Краткосрочное прогнозирование нагрузки на недельный горизонт на примере Еврейской автономной области

Таблица 3

Значения метрик для каждой модели для «ДЭК». ГТП: PEVRAOBL

Прогнозирование	MAPE	R2	RMSE	MAE	WMAPE
VC ППП	8.57	0.34	10874.55	8573.98	8.3
XGBoost	7.7	0.44	10004.63	7797.9	7.54
LSTM	7.99	0.45	9934.74	7792.67	7.54
Bi-LSTM	8.01	0.45	9938.91	7836.96	7.58
CNN- LSTM	7.45	0.49	9485.36	7505.95	7.26
CNN- Bi-LSTM	7.92	0.45	9866.74	7763.62	7.51

Таблица 4

Относительное улучшение точности по сравнению с базовым прогнозом для «ДЭК».

ГТП: PEVRAOBL

Прогнозирование	MAPE	R2	RMSE	MAE	WMAPE
XGBoost	10.15%	29.41%	8.0%	9.05%	9.16%
LSTM	6.77%	32.35%	8.64%	9.11%	9.16%
Bi-LSTM	6.53%	32.35%	8.6%	8.6%	8.67%
CNN- LSTM	13.07%	44.12%	12.77%	12.46%	12.53%
CNN- Bi-LSTM	7.58%	32.35%	9.27%	9.45%	9.52%

Выводы

В рамках исследования разработаны модели краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки на основе методов машинного обучения — градиентного бустинга (XGBoost) и рекуррентных нейросетей (включая LSTM и их модификации). В моделирование интегрировано векторно-временное кодирование, направленное на более точное представление сезонных и временных закономерностей.

Применение векторно-временного кодирования существенно усиливает способность моделей учитывать сложные временные зависимости, повышая точность прогнозирования. Модель XGBoost показала наибольшую стабильность при высоком уровне точности, в то время как нейросетевые подходы обеспечили более гибкую адаптацию к нелинейным и переменным структурам нагрузки.

Наиболее значимый прирост точности зафиксирован на площадке PAMURENE — снижение ошибки MAPE составило до 30 % по сравнению с официальными прогнозами АТС. Разработанные модели также подтвердили свою устойчивость и на других площадках, что указывает на их универсальность и способность адаптироваться к различным профилям нагрузки.

Предложенные подходы пригодны для использования в задачах оперативного планирования потребления электроэнергии, а также обладают потенциалом масштабирования на различные сегменты рынка — от жилых и промышленных объектов до систем управления

распределённой генерацией и микросетями. Их внедрение способствует повышению эффективности энергосистем, улучшению баланса между потреблением и закупками, и снижению затрат для энергокомпаний.

Будущие исследования планируется направить на расширение географии тестирования, включение дополнительных факторов (например, погодных и ценовых данных), а также на интеграцию моделей прогнозирования в системы поддержки принятия решений для операторов и конечных потребителей.

Литература

1. Васенин Д.Н., Подвальный С.Л., Саввин Н.В. Повышение точности краткосрочного прогнозирования нагрузки с использованием ансамблевых моделей и погодных данных // Инженерные системы и сооружения. 2024. № 4(58). С. 72–87.
2. Короткевич М.А., Курачинский В.В. Прогнозирование электрической нагрузки энергосистемы на следующие сутки с использованием метода искусственных нейронных сетей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2010. № 2. С. 5–11.
3. Прогнозирование нагрузки на электросеть как способ эффективного управления потреблением электрической энергии / А.Д. Моргоева [и др.] // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. Т. 17. № 4. С. 39–51.
4. Ермоленко Т.В., Котенко В.Н., Винник А.О. Исследование эффективности предсказательных моделей для системы анализа и мониторинга энергопотребления на предприятиях угольной промышленности // Проблемы искусственного интеллекта. 2022. № 4 (27). С. 25–34.
5. Серебряков Н.А. Применение ансамбля глубоких нейронных сетей в задачах краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего

поставщика электроэнергии // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2 (51). С. 52–60.

6. Навигатор диспетчера: современные модели оперативного прогноза нагрузки распределительных электрических сетей / Н.Д. Арапов [и др.] // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. № 12 (137). С. 24–32.

7. Саввин Н.В., Васенин Д.Н., Свиридов Д.С. Обновление метода обработки информации для повышения точности краткосрочного прогноза электропотребления (на примере комплекса объектов инженерного кампуса университета) // Инженерные системы и сооружения. 2025. № 1 (59). С. 149–154.

8. Анализ долгосрочного энергопотребления в жилом секторе с применением LSTM-моделирования /

Д.Н. Васенин, П.А. Головинский, С.Л. Подвальный, Н.В. Саввин // Инженерные системы и сооружения. 2023. № 4 (54). С. 59–69.

9. General short-term electric load forecasting based on a multitask temporal convolutional network under COVID-19 conditions / Z. Zhang [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol. 147. Pp. 108811.

10. Котельникова А.Ю., Ванин А.С. Методы краткосрочного прогнозирования нагрузки для применения в интеллектуальных электрических сетях // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов, 2016. С. 122-125.

Поступила 23.05.2025; принята к публикации 07.07.2025

Информация об авторах

Подвальный Семён Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

Саввин Никита Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); программист, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (109028, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, 20), e-mail: savvin.nikita.work@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9163-6234>

Васенин Дмитрий Николаевич – PhD, исследователь, Университет Брешии (25123, Италия, г. Брешия, Виа Бранца, д. 38), e-mail: d.vasenin@unibs.it, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7028-9984>

Шахова Анастасия Андреевна – студент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: anastasia.shakhova1@gmail.com

IMPROVING THE ACCURACY OF TIME SERIES FORECASTING USING VECTOR TIME CODING AND MACHINE LEARNING MODELS

S.L. Podval'ny¹, N.V. Savvin^{1,2}, D.N. Vasenin³, A.A. Shakhova⁴

¹ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

² HSE University, Moscow, Russia

³ University of Brescia, Brescia, Italy

⁴ Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper presents the results of an empirical comparison between official short-term electricity consumption forecasts provided by the Market Trading System Operator (ATS) and forecasts generated using modern machine learning models. The study examined several neural network architectures, including Long Short-Term Memory (LSTM), Bidirectional LSTM (Bi-LSTM), Convolutional Neural Network + LSTM (CNN-LSTM), Convolutional Neural Network + Bi-LSTM (CNN-Bi-LSTM), as well as the gradient boosting model Extreme Gradient Boosting (XGBoost). Testing was conducted on real historical electricity consumption data provided by ATS for the period from 2011 to June 2016. Two nodes were selected as case studies: PAMURENE and PEVRAOBL. Forecast accuracy was evaluated using standard metrics: Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), coefficient of determination (R^2), and Weighted Mean Absolute Percentage Error (WMAPE). The results demonstrated a significant improvement in forecast accuracy—up to 30%—compared to the official ATS forecasts

Key words: time series forecasting, load forecasting, energy market, ATS, machine learning, LSTM, BiLSTM, XGBoost

References

1. Vasenin D.N., Podvalny S.L., Savvin N.V. “Improving the accuracy of short-term load forecasting using ensemble models and weather data”, *Engineering Systems and Structures (Inzhenernye sistemy i sooruzheniya)*, 2024, no. 4(58), pp. 72–87.
2. Korotkevich M.A., Kurachinsky V.V. “Day-ahead power load forecasting of the energy system using artificial neural networks”, *Energetics. Proceedings of Higher Education Institutions and CIS Energy Associations (Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG)*, 2010, no. 2, pp. 5–11.

3. Morgoeva A.D. et al. "Power grid load forecasting as a method of efficient electricity consumption management", *News of Higher Education Institutions of the Chernozem Region (Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya)*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 39–51.
4. Ermolenko T.V., Kotenko V.N., Vinnik A.O. "Study of the effectiveness of predictive models for the energy consumption analysis and monitoring system at coal industry enterprises", *Problems of Artificial Intelligence (Problemy iskusstvennogo intellekta)*, 2022, no. 4 (27), pp. 25–34.
5. Serebryakov N.A. "Application of deep neural network ensemble in short-term forecasting of hourly electricity consumption by a guaranteed electricity supplier", *Electrotechnical Systems and Complexes (Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы)*, 2021, no. 2 (51), pp. 52–60.
6. Arapov N.D., Belyakov D.A., Moskovoy I.V., Rykovanov S.N., Khozyainov M.A. "Dispatcher's navigator: modern models for operational load forecasting of distribution power grids", *Automation and IT in Energy (Avtomatizatsiya i IT v energetike)*, 2020, no. 12 (137), pp. 24–32.
7. Savvin N.V., Vasenin D.N., Sviridov D.S. "Justification of an information processing method to improve the accuracy of short-term electricity consumption forecasting (case study of an engineering campus facilities complex)", *Engineering Systems and Structures (Inzhenernye sistemy i sooruzheniya)*, 2025, no. 1 (59), pp. 149–154.
8. Vasenin D.N., Golovinsky P.A., Podvalny S.L., Savvin N.V. "Long-term energy consumption analysis in the residential sector using LSTM modeling", *Engineering Systems and Structures (Inzhenernye sistemy i sooruzheniya)*, 2023, no. 4 (54), pp. 59–69.
9. Zhang Z., Liu J., Pang S., Shi M., Goh H.H., Zhang Y., Zhang D. "General short-term electric load forecasting based on a multitask temporal convolutional network under COVID-19 conditions", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, vol. 147, p. 108811.
10. Kotelnikova A.Yu., Vanin A.S. "Short-term load forecasting methods for use in smart grids", *Energy Efficiency and Energy Security of Production Processes (Energoeffektivnost' i energobezopasnost' proizvodstvennykh protsessov)*, 2016, pp. 122–125.

Submitted 23.05.2025; revised 07.07.2025

Information about the authors

Semyen L. Podval'ny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

Nikita V. Savvin, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia); programmer at National Research University Higher School of Economics (20 Myasnitskaya St., Moscow 109028, Russia) e-mail: savvin.nikita.work@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9163-6234>

Dmitriy N. Vasenin, PhD, researcher, University of Brescia (38 Via Branza, Brescia 25123, Italy), e-mail: d.vasenin@unibs.it, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7028-9984>

Anastasiya A. Shakhova, student, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: anastasiya.shakhova1@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ МИНИМУМА СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ В ЗАДАЧЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ

М.А. Глинянов, С.Ю. Болотова, В.Ю. Дорошенко

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: борьба с помехами является одной из ключевых задач в радиотехнике и связи. Одним из подходов для ее решения является пространственная компенсация помех с использованием адаптивных антенных решеток (ААР). ААР обеспечивают возможность динамического управления диаграммой направленности, что позволяет направить главный лепесток диаграммы направленности в направлении полезного сигнала и сформировать нули в направлении помех. Формирование диаграммы направленности может быть осуществлено в соответствии с различными критериями оптимальности, такими как минимум среднеквадратической ошибки (MSE), максимум отношения уровня сигнала к уровню помех и шумов и другие. В данном исследовании рассмотрен критерий минимума среднеквадратической ошибки. Описаны подходы к поиску минимума целевой функции методом прямого обращения матриц, алгоритмом наискорейшего спуска (LMS) и методом сопряженных градиентов (CG), представлена структурная схема пространственного компенсатора помех. Приведены результаты экспериментальных исследований. Рассмотренный метод пространственной компенсации помех не требует априорных знаний о статистических свойствах сигнала и помех, направлении их прихода, а также о геометрии антенной решетки и может быть применен для случаев, когда полезный принимаемый сигнал является слабым и не может быть обнаружен на фоне шумов и помех

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка, алгоритм адаптации диаграммы направленности, пространственный компенсатор помех

Введение

Адаптивные алгоритмы цифровой обработки сигналов получили значительное распространение, в том числе в задачах телекоммуникаций и связи [1, 2]. Широко применяются адаптивные частотные фильтры, эквалайзеры, компенсаторы эха и многие другие адаптивные системы. Популярность адаптивных алгоритмов обусловлена их возможностью работать в изменяющихся условиях.

Адаптивные цифровые фильтры, работающие в частотно-временной области, используют для компенсации искажений сигнала в каналах связи и частотно-избирательного подавления помех. Вместе с тем, в задачах радиоприема наряду с частотно-временными фильтрами, применяют фильтрацию в пространственной области, которую осуществляют посредством фазированных антенных систем.

Приемная фазированная антенная система представляет собой набор отдельных антенных элементов, подключенных к электронной схеме пространственной обработки, с выхода которой обработанный сигнал поступает на приемное устройство. Принцип пространственной обработки основан на формировании диаграммы направленности антенной системы путем весового суммирования выходных сигналов от-

дельных элементов. При этом веса суммирования формируют таким образом, чтобы получить требуемые свойства итоговой (суммарной) диаграммы направленности, например, сформировать максимальный пик направленности в направлении полезного сигнала и нули в направлении помех. Очевидно, что в условиях изменяющейся сигнально-помеховой обстановки система пространственной обработки должна быть адаптивной. Наиболее широкие возможности адаптации обеспечивают фазированные антенные системы, в которых осуществляется независимое преобразование сигналов отдельных антенных элементов в цифровую форму, а вся дальнейшая обработка осуществляется вычислительным устройством.

Для поиска оптимальных весов суммирования используют различные критерии оптимальности, позволяющие сформировать целевую функцию задачи оптимизации. Известны, в том числе, критерий максимального отношения сигнал-шум и критерий минимума среднеквадратичной ошибки [1, 3].

Критерий максимума отношения сигнал-шум является наиболее отвечающим требованиям задач радиоприема. Вместе с тем, этот критерий требует значительного объема априорных сведений. Прежде всего, для реализации этого критерия необходимо знание статистических свойств полезного сигнала и помех. На практике, однако, чаще всего таких знаний нет, и при-

ходится обходиться только той или иной выборочной оценкой. При этом, зачастую не имеется возможности оценить статистические свойства сигнала и помех по отдельности. Другим важным требованием критерия максимума отношения сигнал-шум является необходимость точного знания свойств антенных элементов, их расположения в пространстве, а также вносимого влияния радиочастотной части тракта обработки. Однако при практической реализации антенной системы учесть эти факторы довольно трудно, как вследствие принципиально неустранимой технологической неточности изготовления, так и вследствие подверженности влиянию внешней среды: окружающих объектов, температуры, влажности и прочих.

По этим причинам критерий максимума отношения сигнал-шум на практике может быть использован в ограниченном количестве случаев и применяется, чаще всего, для теоретических исследований, в том числе для оценки предельно достижимого отношения сигнал-шум.

В системах адаптивной обработки сигналов широкое распространение получил критерий минимума среднеквадратичной ошибки (mean square error, MSE) [4], основанный на минимизации среднего квадрата отклонения между выходным и некоторым опорным сигналами. Применение критерия MSE в пространственном компенсаторе помех не всегда может обеспечить достижение предельного значения величины отношения сигнал-шум, однако позволяет минимизировать объем априорно необходимых сведений о сигнале, помехах и геометрии антенной решетки.

Далее в разделе 1 приведено описание теоретических основ работы адаптивных антенных решеток, введена целевая функция по критерию MSE и ряд подходов к ее минимизации, приведена структурная схема пространственного компенсатора на основе MSE. В разделе 2 приведены результаты экспериментальных исследований работы пространственного компенсатора помех. Показано, что применение адаптивной антенной решетки обеспечило повышение отношения сигнал-шум более чем на 20 дБ.

1. Адаптивные антенные решетки

1.1. Введение в адаптивные антенные решетки

Антенная решетка — это совокупность из N антенных элементов, разнесенных в пространстве [5, 6, 7]. В дальнейшем рассматрива-

ются приемные антенные решетки. На входе элементов антенной решетки формируется набор сигналов $x_1(t), x_2(t) \dots x_N(t)$, который можно записать в векторной форме:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t) \dots x_N(t)]^T. \quad (1)$$

Формирование диаграммы направленности антенной решетки достигается весовым суммированием входных сигналов отдельных элементов решетки. Выходной сигнал адаптивной антенной решетки $y(t)$ можно представить как

$$y(t) = \sum_{k=1}^N w_k x_k(t) = w^H X(t), \quad (2)$$

где $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ — комплексные весовые коэффициенты, задающие амплитудные веса и фазовые сдвиги сигналов отдельных каналов. Задача алгоритма адаптации заключается в поиске значений весовых коэффициентов, обеспечивающих достижение заданного критерия оптимальности. При непрерывной работе алгоритма адаптации диаграмма направленности адаптируется к текущей сигнально-помеховой обстановке. Антенная решетка из N элементов, имея N степеней свободы, может сформировать один основной лепесток в направлении сигнала и $N-1$ нулей в направлении помех [1].

1.2. Критерий минимума среднеквадратичной ошибки (MSE)

Критерий минимума среднеквадратичной ошибки основан на минимизации целевой функции ξ — среднего квадрата разности между выходным сигналом АР $y(t)$ и некоторым полезным (опорным) сигналом $d(t)$.

$$d(t) - w^H X(t). \quad (3)$$

Возводя выражение в квадрат, получается

$$\begin{aligned} (d(t) - w^H X(t))^2 &= \\ &= d(t)d^*(t) - w^H X(t)d^*(t) - \\ &- d(t)X^H(t)w + w^H X(t)X^H(t)w. \end{aligned} \quad (4)$$

Применяя теперь операцию математического ожидания по ансамблю реализаций, получается искомый критерий:

$$\xi = \frac{\overline{d(t)d^*(t)} - w^H \overline{X(t)d^*(t)}}{-\overline{d(t)X^H(t)w} + w^H \overline{X(t)X^H(t)w}} \quad (5)$$

Одним из преимуществ критерия MSE является существование единственного глобального минимума, что обусловлено квадратичным видом целевой функции. Произведение $\overline{X(t)X^H(t)}$, рассмотренное в матричном виде, называется корреляционной матрицей входного сигнала:

$$R_{xx} = \overline{X(t)X^H(t)} = \begin{pmatrix} \overline{x_1(t)x_1^*(t)} & \dots & \overline{x_1(t)x_N^*(t)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{x_N(t)x_1^*(t)} & \dots & \overline{x_N(t)x_N^*(t)} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Элементы корреляционной матрицы представляют собой коэффициенты корреляции между входными сигналами элементов антенной решетки. Произведение отчетов входных сигналов элементов решетки и опорного сигнала, представляют собой вектор взаимной корреляции, обозначаемый как r_{xd} :

$$r_{xd} = [\overline{x_1(t)d^*(t)}, \overline{x_2(t)d^*(t)} \dots \overline{x_N(t)d^*(t)}]^T. \quad (7)$$

С использованием новых обозначений формула для среднеквадратичной ошибки примет вид:

$$\xi = \overline{d(t)d^*(t)} - w^H r_{xd} - r_{xd}^H w + w^H R_{xx} w. \quad (8)$$

Адаптация заключается в поиске минимума функции ξ с помощью подстройки весовых коэффициентов w . В результате адаптации выходной сигнал адаптивной антенной решетки $y(t)$ стремится приблизиться к опорному сигналу $d(t)$.

1.3. Алгоритмы адаптации

Алгоритм адаптации — это алгоритм подстройки весовых коэффициентов с целью минимизации целевой функции. При выборе алгоритма для решения конкретной прикладной задачи необходимо учитывать такие параметры, как длительность переходного процесса, скорость сходимости, вычислительная сложность и способность алгоритма отслеживать

изменяющиеся характеристики сигнала и помех. Ниже рассмотрены три алгоритма адаптации по критерию MSE, известные из литературы [8, 9, 10].

1.3.1. Прямое обращение матриц

Как отмечалось ранее, целевая функция (8) является унимодальной, то есть у нее существует единственный глобальный минимум. Координаты минимума могут быть найдены приравнением градиента целевой функции к нулю:

$$\nabla_{w^*} \xi = \frac{\partial \xi}{\partial w^*} = R_{xx} w - r_{xd} = 0, \quad (9)$$

откуда

$$R_{xx} w = r_{xd}. \quad (10)$$

Полученное равенство (10) называется уравнением Винера-Хопфа [4]. Полагая, что матрица R_{xx} является невырожденной (обратимой), можно сразу записать оптимальный вектор w :

$$w = R_{xx}^{-1} r_{xd}, \quad (11)$$

соответствующий минимуму целевой функции. Вектор w называется винеровским вектором или оптимальным винеровским решением [4].

Матрица R_{xx} оценивается по конечной выборке. Часто при ее подсчетах она является вырожденной из-за того, что входные сигналы на антеннах сильно коррелированы (являются линейно зависимыми) и непосредственное использование выражения (11) невозможно.

1.3.2. Least mean square (LMS)

Алгоритм Least mean square (LMS) [4, 11, 12] относится к стохастическим градиентным методам. Необходимо минимизировать выражение (8), его градиент равен (9). Используя оценки матрицы R_{xx} и r_{xd} на выборке в один отчет, тогда градиент выражается как:

$$\begin{aligned} \hat{\nabla}_{w^*} &= R_{xx}(k)w(k-1) - r_{xd}(k) = \\ &= X(k)X^H(k)w(k-1) - X(k)d^*(k) = \\ &= -X(k)(d^*(k) - X^H(k)w(k-1)) = \\ &= -X(k)\xi^*(k) \end{aligned} \quad (12)$$

Обновления весовых коэффициентов производится по следующей формуле:

$$w_{t+1} = w_t - \mu(-\hat{\nabla}_{w^*}), \quad (13)$$

параметр μ определяет скорость и устойчивость процесса адаптации.

Данный метод прост в реализации и имеет низкую вычислительную сложность, в нем не требуется для вычисления градиента возводить ошибки в квадрат и усреднять для вычисления по ним производных, поэтому он является одним из самых распространенных алгоритмов для MSE критерия. Но для обработки сигналов в реальном времени описанный метод отличается своей медленной сходимостью и является неподходящим для решения поставленной задачи.

1.3.3. Conjugate gradient (CG)

Метод сопряженных градиентов Conjugate gradient (CG) [13, 14] является эффективным численным методом оптимизации, который широко используется для решения задач с большими системами линейных уравнений. Этот метод особенно полезен при адаптации антенных решеток, поскольку в нем не требуется явного вычисления обратной матрицы.

Метод используется для минимизации выражения (8), он основан на нахождении базиса $\{p_1, \dots, p_N\}$, составленного из взаимно сопряженных векторов относительно R_{xx} . Тогда решение w в этом базисе можно выразить как:

$$w = \sum_{i=1}^N \alpha_i p_i. \quad (14)$$

Далее вводится понятие невязки, как значение отрицательного градиента:

$$rs_k = r_{xd} - R_{xx} w_k. \quad (15)$$

Начальное приближение вектора w берется как $w_0 = 0$. Первый базисный вектор полагается равным отрицательному градиенту или $p_0 = rs_0$

Последующие векторы в базисе должны быть сопряжены друг с другом относительно

R_{xx} . Для этого используется ортогонализация Грамма-Шмидта:

$$p_k = rs_k - \sum_{i < k} \frac{rs_k^H R_{xx} p_i}{p_i^H R_{xx} p_i} p_i. \quad (16)$$

Следуя полученному направлению, рассчитывается приближение вектора:

$$w_{k+1} = w_k + \alpha_k p_k, \quad (17)$$

где α_k вычисляется по следующей формуле:

$$\alpha_k = \frac{p_k^H rs_k}{p_k^H R_{xx} p_k}. \quad (18)$$

Метод сопряженных градиентов позволяет найти минимум не более чем за N шагов, но на практике чаще используется остановка по норме вектора невязки $\|rs_k\| < \varepsilon$.

CG лишен всех недостатков предыдущих описанных адаптивных алгоритмов, поэтому он использовался как основной метод для адаптации целевой функции.

1.4. Схема работы адаптивного подавления помех

Как говорилось ранее, в данной задаче предполагается неизвестный полезный сигнал, следовательно, нет возможности использовать критерий MSE в его исходном представлении.

Для поставленной задачи предлагается следующая схема компенсатора помех, представленная на рис. 1. В предложенной схеме приближение по критерию MSE будет производиться не к полезному сигналу, а к эталонному сигналу $r(t)$ состоящему из смеси полезного сигнала $d(t)$ и помехи $n(t)$

$$r(t) = d(t) + n(t). \quad (19)$$

В качестве эталона может использоваться сигнал одного из антенных элементов антенной решетки или сигнал специализированного элемента. При этом требуется, чтобы SNR_{dB} , рассчитанный по формуле (20), в антенных элементах был менее 0 дБ.

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} \left(\frac{\overline{d^2(t)}}{\overline{n^2(t)}} \right). \quad (20)$$

Таким образом, после работы адаптивного алгоритма на выходе первого сумматора получается приближенный сигнал по своим статистическим свойствам к сигналу помехи $n(t)$. Затем из эталонного сигнала вычитается приближенный сигнал помехи и на выходе второго сумматора остается только полезный сигнал $d(t)$.

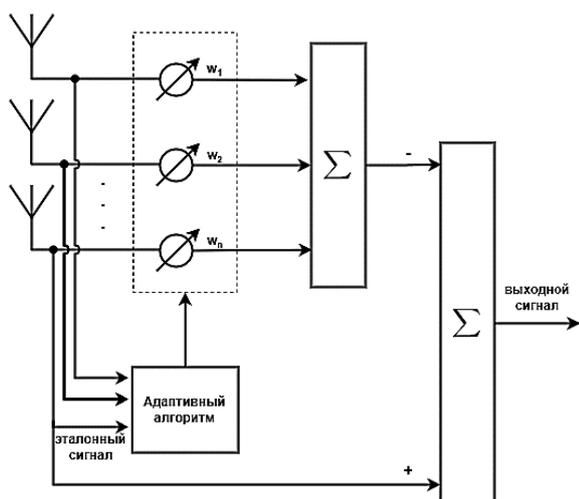


Рис. 1. Схема работы компенсатора помех

Существуют недостатки использования подобной схемы и критерия MSE. В первую очередь, это чувствительность к наличию полезного сигнала в эталонном сигнале. Поэтому стоит отметить, что данная схема будет эффективно работать только в случае, если полезный сигнал будет в значительной мере перекрыт помехой или какими-то способами можно гарантировать отсутствие полезного сигнала в эталонном.

Второй недостаток состоит в том, что так как не используется информация о направлении полезного сигнала и геометрии ААР, отношение сигнала/(помеха + шум) после работы такого алгоритма будет меньше теоретически возможного. Проведенное моделирование показало, что в большинстве случаев теоретический предел превосходит практический результат на ~ 3 дБ, что является приемлемой платой за отсутствие необходимости знать геометрию ААР (то есть, можно отказаться от калибровки) и направления прихода полезного сигнала.

2. Экспериментальные результаты

Для проверки работы алгоритма адаптивной обработки было проведено экспериментальное исследование на эфирных данных.

Приемная антенная решетка представляла собой прямоугольник, в углах которого расположены антенные мачты. На каждой мачте установлены антенны с вертикальной и горизонтальной поляризацией. Таким образом, общее число приемных каналов равнялось восьми, четыре из которых с горизонтальной поляризацией и четыре с вертикальной.

На передающей стороне применялась штыревая антенна, длина радиотрассы составляла 1200 км.

Использованный сигнал — зондирующий сигнал с чередующимися линейно-частотными модулированными импульсами мощностью 300 Вт и 3 Вт.

На рис. 2 представлена часть записи сигнала с одного из каналов приема после применения коррелятора [15]. Полка шума находится на уровне ~ -15 дБ, корреляционные пики мощных импульсов превышают шум на ~ 5 дБ, корреляционные пики слабых импульсов не видны под шумом.

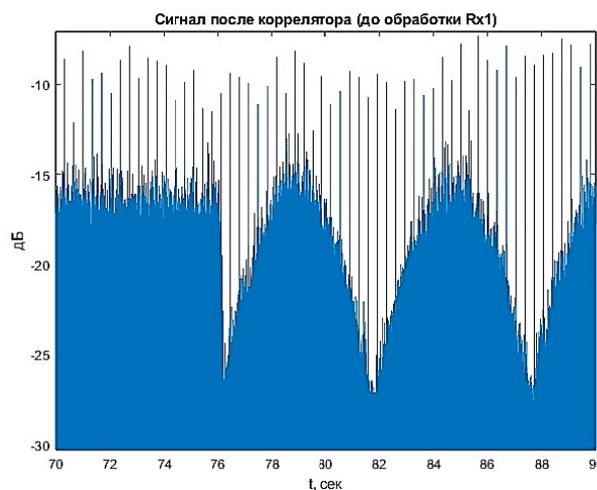


Рис. 2. Сигнал после коррелятора (до обработки)

Необходимо с помощью пространственной обработки добиться подавления помех, чтобы слабые корреляционные пики сигнала также стали различимы. Разность уровней мощности сильных и слабых импульсов, согласно теоретическим расчетам, составляет 20 дБ.

В целях исследования работы схемы компенсатора помех и достижения наилучшего результата был проведен ряд экспериментов с использованием различных методов обработки записи.

Для адаптации алгоритма к различным помехам, которые появляются со временем в эфире, был проведен анализ с изменяемым раз-

мером окна обработки. Каждое окно обрабатывается отдельно, независимо друг от друга. Также в расчетах учитывалась поляризация антенн. В качестве эталонного сигнала, описанного в пункте 1.4 используется один из антенных элементов с учетом рассматриваемой поляризации, причем сам эталонный сигнал в расчетах не учитывается.

На рис. 3 и на рис. 4 представлены графики зависимости SNR_{dB} от размера окна обработки и деления антенн на поляризации.

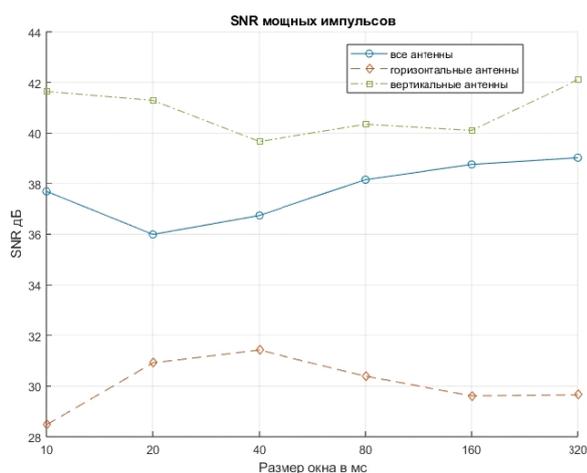


Рис. 3. SNR мощных импульсов

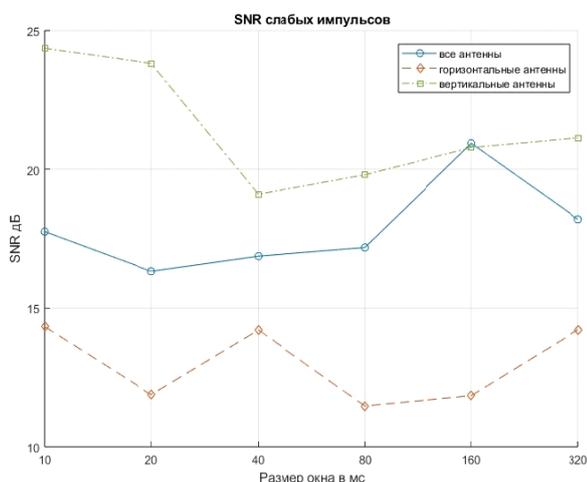


Рис 4. SNR слабых импульсов

Как видно из рис. 3 и рис. 4, при работе со всеми восемью выходными сигналами без деления на поляризации средний SNR_{dB} для сильных импульсов находится на уровне 38 дБ, для слабых — 17 дБ. При использовании антенн только с горизонтальной поляризацией показатели становятся ниже примерно на 5 дБ. Однако при использовании антенн только вер-

тикальной поляризации показатели значительно улучшаются. Для случая с вертикальной поляризацией наилучшие показатели SNR_{dB} достигаются при окне обработки размером в 10 мс.

На рис. 5 представлена запись после обработки при использовании антенн только с вертикальной поляризацией и окном обработки в 10 мс.

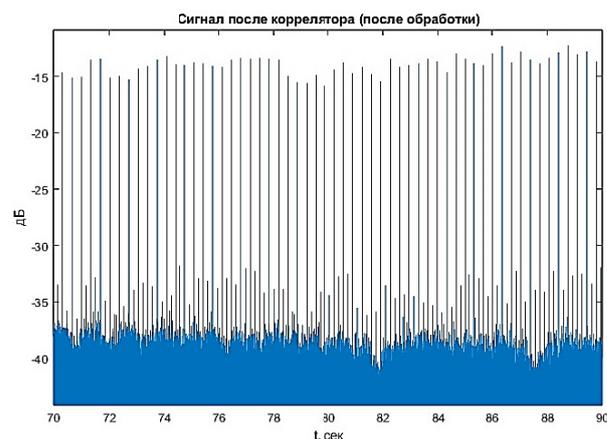


Рис. 5. Сигнал после коррелятора (после обработки)

Корреляционные пики мощных импульсов превышают полку шума на ~22 дБ. Полка шума стала значительно более ровной, что говорит о подавлении помехи до уровня некоррелированных шумов. Корреляционные пики слабых импульсов превышают полку шума на ~6 дБ. Разница мощности между сильными и слабыми пиками составляет примерно ~17 дБ.

Таким образом, получилось максимально приблизиться к теоретическим показателям и значительно снизить уровень помех после пространственной обработки.

Заключение

Описаны основные принципы адаптивной пространственной компенсации помех по критерию минимума среднеквадратичной ошибки (MSE). Рассмотрены подходы к поиску минимума целевой функции методом прямого обращения матриц, алгоритмом наискорейшего спуска (LMS) и методом сопряженных градиентов. Приведена схема пространственного компенсатора помех на основе эталонного сигнала.

На основе экспериментальных данных подтверждена работоспособность алгоритма адаптивной пространственной компенсации помех. Выявлено значительное влияние поляризационных свойств помехи на результат пространственной компенсации. Отмечено, что метод со-

пряженных градиентов является наиболее оптимальным для практической реализации.

Предложенный подход легко переносится на любые многоканальные сенсорные системы. Можно применить данную схему для акустического шумоподавления в потребительской электронике, также в многоканальных системах связи ММО, усиливая полезный сигнал без увеличения передаваемой мощности, в оптических LiDAR-системах, устраняя зеркальные отражения и солнечные блики.

Литература

1. Monzingo R.A., Haupt R.L., Miller T.W. Introduction to adaptive arrays // SciTech Publishing, 2011. 510 p.
2. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
3. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. 200 с.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
5. Balanis C.A. Antenna Theory Analysis and Design // John Wiley and Sons, 2016. 1072 p.
6. Hansen R.C. Phased Array Antennas // John Wiley and Sons, 2001. 486 p.
7. Адаптивные антенные решетки: учебное пособие в 2-х частях / В.А. Григорьев [и др.] / под общ. ред. В.А. Григорьева. СПб.: Университет ИТМО, 2016. Ч. 1. 179 с.
8. Журавлев А.К., Лукошкин А.П., Поддубный С.С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 240 с.
9. Hudson J.E. Adaptive array principles // England, Loughborough: Perer Peregrinus Ltd., 1981. 200 p.
10. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.
11. Widrow B., McCool J., Ball M. The complex LMS algorithm / Proceedings of the IEEE. 1975. Vol. 63. № 4. Pp. 719-720.
12. Frost O.L. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing // Proceedings of the IEEE. 1972. Vol. 60. № 8. Pp. 926-935.
13. G. W. S., Golub G. H., and Loan C. F. V. Matrix Computations // Mathematics of Computation, 1991. Vol. 56. No. 193, 380 p. doi: 10.2307/2008552.
14. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1994. 544 с.
15. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. 2-е издание; пер. с англ. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.

Поступила 20.04.2025; принята к публикации 30.05.2025

Информация об авторах

Глинянов Максим Алексеевич – магистрант, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: vgmaksim@mail.ru
Болотова Светлана Юрьевна – канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: bolotova.svetlana@gmail.com
Дорошенко Василий Юрьевич – инженер, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: goodvy@bk.ru

APPLICATION OF THE STANDARD ERROR MINIMUM CRITERION IN THE PROBLEM OF SPATIAL INTERFERENCE COMPENSATION

M.A. Glinyanov, S.Yu. Bolotova, V.Yu. Doroshenko

Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract: interference control is one of the key tasks in radio engineering and communications. One of the approaches to solve this problem is spatial interference compensation using adaptive antenna arrays (AAA). AAA provides the ability to dynamically control the radiation pattern, which allows one to direct the main lobe of the radiation pattern in the direction of the desired signal and generate zeros in the direction of interference. The radiation pattern can be formed in accordance with various optimality criteria, such as the minimum standard error (MSE), the maximum ratio of the signal level to the level of interference and noise, and others. In this study, we considered the criterion of minimum standard deviation. Approaches to finding the minimum of the objective function using the direct matrix inversion method, the algorithm of steepest descent (LMS) and the conjugate gradient method (CG) are described, and a block diagram of a spatial noise compensator is presented. We present the results of experimental studies. The considered method of spatial interference compensation does not require a priori knowledge of the statistical properties of the signal and interference, the direction of their arrival, as well as the geometry of the antenna array, and can be applied to cases where the useful received signal is weak and cannot be detected against the background of noise and interference

Key words: adaptive antenna array, radiation pattern adaptation algorithm, spatial interference compensator

References

1. Monzingo R.A., Haupt R.L., Miller T.W. "Introduction to adaptive arrays. Institution of engineering and technology", 2011, SciTech Publishing, 510 p.

2. Dzhigan V.I. “Adaptive signal filtering: theory and algorithms” (“Adaptivnaya fil'tratsiya signalov: teoriya i algoritmy”), Moscow: Tekhnosfera, 2013, 528 p.
3. Pistol Kors A.A., Litvinov O.S. “Introduction to the theory of adaptive antennas” (“Vvedenie v teoriyu adaptivnykh antenn”), Moscow: Nauka, 1991, 200 p.
4. Widrow B., Stearns S. “Adaptive signal processing”, 1989, 440 p.
5. Balanis C.A. “Antenna theory analysis and design”, John Wiley & Sons, Inc, 2016.
6. Hansen R.C. “Phased array antennas,” John Wiley and Sons, 2001, 486 p.
7. Grigoryev V.A. et al. “Adaptive antenna arrays” (“Adaptivnye antenyne reshetki”), textbook, St. Petersburg: University ITMO, 2016, 179 p.
8. Zhuravlev A.K., Lukoshkin A.P., Poddubny S.S. “Signal processing in adaptive antenna arrays” (“Obrabotka signalov v adaptivnykh antenykh reshetkakh”), St. Petersburg: Leningrad University Press, 1983, 240 p.
9. Hudson J.E. “Adaptive array principles”, England, Loughborough: Perer Peregrinus Ltd., 1981, 200 p.
10. Ratynskiy M.V. “Adaptation and super-resolution in antenna arrays” (“Adaptatsiya i sverkhrazreshenie v antenykh reshetkakh”), Moscow: Radio i svyaz', 200 p.
11. Widrow B., McCool J., Ball M. “The complex LMS algorithm”, *Proceedings of the IEEE*, 1975, vol. 63, no. 4, pp. 719–720.
12. Frost O.L. “An algorithm for linearly constrained adaptive array processing”, *Proceedings of the IEEE*, 1972, vol. 60, no. 8, pp. 926–935.
13. G.W.S., Golub G.H., Loan C.F.V. “Matrix computations”, *Mathematics of Computation*, 1991, vol. 56, no. 193, 380 p. doi: 10.2307/2008552.
14. Amosov A.A., Dubinskiy Yu.A., Kopchenova N.V. “Computational methods for engineers” (“Vychislitel'nye metody dlya inzhenerov”), textbook, Moscow: Vysshaya shkola, 1994, 544 p.
15. Lyons R. “Digital Signal processing”, Moscow: Binom-Press LLC, 2006, 656 p.

Submitted 20.04.2025; revised 30.05.2025

Information about the authors

Maksim A. Glinyanov, MA, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: vrnmaksim@mail.ru

Svetlana Yu. Bolotova, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: bolotova.svetlana@gmail.com

Vasiliy Yu. Doroshenko, Engineer, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: goodvy@bk.ru

КОРРЕКТИРОВКА ОПЕРАЦИЙ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ОТ ТРЕТЬЕГО ЛИЦА

А.В. Городилов, А.И. Кононова

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»,
г. Москва, Россия

Аннотация: рассматривается методика корректировки операций робота-манипулятора с применением машинного зрения от третьего лица. Описаны основные трудности, возникающие при использовании камер, закрепленных на манипуляторе, и преимущества подхода, при котором камера располагается отдельно от робота. Исследование фокусируется на задаче определения необходимости корректировки положения робота перед выполнением целевого действия. В качестве тестовой задачи рассматривается нажатие на кнопку. Предложена многоступенчатая методика обработки изображения, включающая предварительную обработку, выделение ключевых элементов и классификацию с применением сверточных нейронных сетей. Оценены вероятности успешного нажатия и промаха для предложенной методики. Создан и описан стенд, используемый в экспериментах. Описана архитектура и гиперпараметры нейронной сети как для одноступенчатого решения, так и для третьего этапа предложенного трёхступенчатого решения. Проведены эксперименты, подтверждающие эффективность предложенного подхода; показано, что разбиение задачи на несколько этапов позволяет повысить точность модели и снизить вычислительные затраты. Предложенная методика позволяет повысить гибкость и адаптивность манипуляторов при взаимодействии с объектами, снижая зависимость от точности начальной калибровки и минимизируя необходимость ручного вмешательства

Ключевые слова: манипулятор, зрение, нейросети, коррекция, изображение

Постановка задачи

Роботы-манипуляторы используются для выполнения различных операций в промышленности и лабораторных условиях. Как и другие роботы, манипуляторы нуждаются в ориентации в пространстве и поиске объектов манипуляции. Эта задача часто решается с помощью машинного зрения [1], так как машинное зрение предоставляет много информации и позволяет создавать универсальные решения, подобно тому, как естественное зрение дает наиболее универсальный и богатый источник информации для человека [2].

Для сбора данных для машинного зрения используются камеры. При этом возможно несколько вариантов их расположения.

1. Вид от первого лица, когда камера, отвечающая за зрение, располагается прямо на манипуляторе, причем на верхнем сегменте [3]. Количество камер при этом определяется количеством манипуляторов: в составе сложного робота такое расположение потребует множества камер.

2. Вид от третьего лица, когда камера располагается в стороне от робота и неподвижна. В этом случае часто используются две и более камеры, расположенные с разных сторон от робота [4]. В том случае, когда манипулятор закреплён на мобильной платформе, бортовые камеры могут быть закреплены на ней и дви-

гаться относительно внешней среды, но относительно манипулятора предоставлять вид от третьего лица.

Рассмотрим достоинства и недостатки каждого расположения. Установка камеры непосредственно на манипуляторе, что предполагает вид от первого лица, позволяет согласовать движение камеры и манипулятора и делает решение многих задач проще. Установка нескольких камер вида от третьего лица позволяет выстроить трёхмерную модель внешней среды и затем использовать её при навигации [5]. Установка единственной камеры вида от третьего лица упрощает и удешевляет монтаж робота.

В настоящее время для задач интеллектуального управления роботом широко применяется машинное обучение. Для обучения роботов могут использоваться как специально снятые видео, так и видео, предназначенные для людей, подобно тому, как обучаются генеративные модели, в частности, чат-боты [6]. Отметим, что обучающие видео для людей снимаются при помощи одной камеры, неподвижной или, реже, перемещаемой оператором независимо от манипулятора.

Таким образом, для успешного обучения расположение бортовой камеры робота должно соответствовать расположению камеры при съёмке. В случае вида от первого лица обучающие видео необходимо снимать аналогичной камерой, установленной на вершине манипулятора и двигающейся вместе с ним. При исполь-

зовании нескольких камер независимо от мест их крепления необходимы несколько синхронизированных видео. Единственная неподвижная камера вида от третьего лица соответствует большинству обучающих видео, предназначенных для людей.

Соответственно, в данном исследовании для поиска объекта, ориентации робота и при необходимости корректировки и повторного выполнения используется камера, которая находится в стороне от робота и объекта, то есть имеет вид от третьего лица [7].

Далее необходимо выбрать тестовую задачу, которую требуется выполнить при помощи робота-манипулятора. При этом настройка робота для работы с конкретным объектом осуществляется методом машинного обучения. Это позволит применить полученные результаты к разнообразным объектам.

Метод исследования

Вначале решим тестовую задачу для частного случая в ходе натурного эксперимента, а затем обобщим полученные результаты и сформулируем принципы, которые будут проверены в других экспериментах.

Условия первого эксперимента максимально простые. Это позволит сосредоточиться на поставленных целях, не отвлекаясь на трудности, которые встречаются в реальных задачах, но их влияние сложно оценить. Последующие эксперименты позволят сделать выводы о влиянии этих факторов. Примем следующие упрощения для данного эксперимента:

1. Относительное положения основание манипулятора и робота в пространстве фиксировано.
2. Используется равномерное и хорошее освещение.
3. Объект манипуляции перемещается в одной плоскости, перпендикулярной оптической оси объектива камеры.
4. Задача заключается в определении необходимости корректировки положения робота для выполнения операции, а выполнение корректировки останется за рамками данного этапа эксперимента.

Тестовая задача — нажатие кнопки

В качестве задачи возьмем нажатие на кнопку. Нажатие на кнопку очень просто зарегистрировать, поэтому эта операция не добавит в исследование сложности, не связанной с целью.

Для нажатия на кнопку необходимо произвести следующие действия:

1. Определить положение кнопки.
2. Изменить положение манипулятора так, чтобы конец захвата находился вблизи кнопки.
3. Определить необходимость корректировки положения.
4. При необходимости скорректировать позицию манипулятора.
5. Произвести захват и нажатие.

Действия 2 и 5 относительно просты. Действия 1, 3, 4 требуют использования машинного зрения, и каждое представляет из себя сложную задачу. Каждая из задач 1, 3, 4 решалась отдельно, в данной статье рассматривается решение задачи 3.

Задача определения необходимости корректировки положения заключается в том, чтобы по изображению, полученному с камеры, определить, находится ли манипулятор в положении, в котором после выполнения замаха и нажатия будет нажата кнопка, а не произойдет промах. Эта задача является задачей бинарной классификации. При наличии классификатора, способного её решать, можно произвести запуск классификации в каждом положении манипулятора, и если положение соответствует попаданию по кнопке — произвести захват и нажатие, а если нет — изменить положение и выполнить классификацию нового положения.

Само по себе решение этой задачи еще не делает решение более крупной задачи нажатия на кнопку тривиальной. Классификатор будет иметь некоторую вероятность ложноположительного результата. Это связано с тем, что как ложноположительный, так и ложноотрицательный результат приводит примерно одинаковым потерям — ненужным перемещениям манипулятора, что вынуждает настраивать порог чувствительности классификатора для минимизации обеих ошибок, а не только ложноположительной. Классификатор, имеющий характеристику AUC-ROC меньше 1, то есть любой реальный классификатор, будет иногда ошибаться [8].

Рассмотрим задачу нажатия на кнопку, состоящую из действий 1—5, в целом. Действия 1 и 2, то есть определение начального положения и перемещение манипулятора к кнопке, не являются темой данной статьи. Отметим только, что действие 2 состоит из двух этапов: перемещение манипулятора в ближайшую окрестность кнопки, что выполняется с единичной вероятностью, и корректировка положения внутри этой окрестности, которая выполняется по тому же алгоритму, что и действие 4. Во время корректировки перемещение манипулятора мало, а его

положение оценивается при помощи единственной неподвижной камеры вида от третьего лица; таким образом, погрешность корректировки может быть велика, в том числе возможно ошибочное изменение верного положения манипулятора (над кнопкой) на неверное (не над кнопкой). В качестве первого приближения примем, что вероятность установки манипулятора в верное положение при корректировке не зависит от начального положения манипулятора и равна q ; тогда вероятность верного составляет $1-q$.

После действия 2, то есть начальной корректировки, выполняется действие 3 — классификация начального положения манипулятора. При этом верное положение манипулятора может быть классифицировано как неверное с вероятностью $p_{ло}$ и как верное с вероятностью $p_{ин} = 1-p_{ло}$. Аналогично, неверное положение может быть с вероятностью $p_{лн}$ классифицировано как верное и с вероятностью $p_{ио} = 1-p_{лн}$ как неверное.

Для успешного нажатия на кнопку необходимо не только верное положение манипулятора, но и верная его классификация. Если классификатор реализован независимо от алгоритма корректировки, то вероятность успешно попасть по кнопке сразу после действия 2 (на первом шаге, то есть до изменения положения) составляет

$$p_{успех \text{ на шаге } 1} = (1-q) \cdot (1-p_{ло}),$$

вероятность промаха мимо кнопки, когда неверное положение манипулятора было ошибочно принято за верное:

$$p_{промах \text{ на шаге } 1} = q \cdot p_{лн},$$

а вероятность новой корректировки (перехода на второй шаг) складывается из вероятностей ложноотрицательной и истинно отрицательной классификации — обозначим её p_k :

$$p_{переход \text{ к шагу } 2} = (1-q) \cdot p_{ло} + q \cdot (1-p_{лн}) = p_k.$$

На втором шаге ситуация полностью аналогична первому:

$$p_{успех \text{ на шаге } 2} = p_k \cdot (1-q) \cdot (1-p_{ло}),$$

$$p_{промах \text{ на шаге } 2} = p_k \cdot q \cdot p_{лн},$$

$$p_{переход \text{ к шагу } 3} = p_k^2$$

и так далее.

Вероятности успеха и промаха за не более чем n шагов складывается из вероятностей успеха или промаха на каждом шаге:

$$p_{успех} = (1 + p_k + \dots + p_k^{n-1}) \cdot (1-q) \cdot (1-p_{ло}) = (1-p_k^n) \cdot (1-p_k)^{-1} \cdot (1-q) \cdot (1-p_{ло})$$

и

$$p_{промах} = (1 + p_k + \dots + p_k^{n-1}) \cdot q \cdot p_{лн} = (1-p_k^n) \cdot (1-p_k)^{-1} \cdot q \cdot p_{лн}.$$

вероятность не завершить задачу за n шагов:

$$p_{переход \text{ к шагу } n+1} = p_k^n$$

стремится к нулю при $n \rightarrow \infty$.

Удостоверимся, что использование классификатора не ухудшает вероятность успеха. Без классификатора и итерационной корректировки вероятность успеха равна вероятности верного начального положения $1-q$, вероятность промаха — q . При сколько-нибудь успешной работе классификатора $p_{ло} < 1/2$ и $p_{лн} < 1/2$, тогда

$$1 - p_{лн} > 1/2 > p_{ло},$$

следовательно

$$1 - p_k = 1 - (1-q) \cdot p_{ло} - q \cdot (1-p_{лн}) < 1 - p_{ло}$$

и вероятность успеха выше $1-q$ при $n \rightarrow \infty$:

$$p_{успех} \rightarrow (1-p_k)^{-1} \cdot (1-q) \cdot (1-p_{ло}) > (1-p_{ло})^{-1} \cdot (1-q) \cdot (1-p_{ло}) = 1-q.$$

Аналогично, $1 - p_k > p_{лн}$, так что вероятность промаха $p_{промах} < q$.

Для повышения вероятности успеха и снижения вероятностей промаха и незавершения задачи необходимо снизить все три вероятности ошибки: q , $p_{лн}$ и $p_{ло}$. При этом, так как промах может привести к поломке манипулятора, снижение именно его вероятности наиболее критично, для чего необходимо снизить q и $p_{лн}$.

В рамках данной статьи описывается снижение $p_{лн}$ и $p_{ло}$. Задача создания классификатора является важным и практически необходимым элементом решения задачи нажатия на кнопку, так как полностью избежать некорректных положений и их коррекции для реального робота невозможно.

Эта задача теоретически может быть решена машинным обучением без какой-либо предварительной обработки и разделения на этапы. Для этого на вход модели подаются необработанные данные, а модель сама будет определять, какие признаки являются существенными. Однако у этого подхода есть недостатки [9] — в частности, необходимость создания большой обучающей выборки под каждое применение, а также большие вычислительные затраты на работу сложной модели.

Была произведена оценка возможности решения этой задачи напрямую путем опытного обучения подходящей модели, результаты приведены далее в статье. Однако они оказались неудовлетворительными, и поэтому задача была разбита на еще несколько стадий:

1. Определить часть изображения, где находится конец манипулятора и вырезать его для дальнейшей обработки.

2. Провести предварительную обработку изображения с целью устранения искажений и помех.

3. По полученному изображению провести классификацию.

Выполнение стадий 1 и 2 имеет смысл, только если задача классификации по выделенному и обработанному изображению окажется успешной. Поэтому сначала решили именно эту задачу, её решение также приведено далее в статье. Решение задач на стадиях 1 и 2 выведено за рамки данной статьи.

Одноступенчатое решение задачи определения необходимости корректировки

Хотя одноступенчатое решение имеет малую вероятность успеха, было решено произвести попытку его получить. Такое решение, если бы оно было способно работать после относительно небольшого времени построения обучающей выборки и обучения, сильно упростило бы достижение изначально поставленных целей. Кроме того, попытка его достижения даст базовые значения объема выборки и времени обучения, с которыми можно будет сравнить другие варианты решения.

Установка, которая использовалась для обучения, показана на рис. 1. Установка состоит из четырех частей — кнопки, подключенной к контроллеру Arduino Uno, робота-манипулятора HiWonder xArm 1S, web-камеры с разрешением 1920x1080 и компьютера с операционной системой Ubuntu 24.04 и интерпретатором python 3.12, к которому подключены все эти компоненты через интерфейс USB.



Рис. 1. Установка для одноступенчатого решения задачи необходимости корректировки

Кнопка подключена к контроллеру в схеме с подтягивающим резистором: резистор соединяет входной контакт контроллера с землёй, а сама кнопка подключена к этому же контакту и к +5 В. Такое подключение обеспечивает низкий уровень (логический ноль) на входном пине, пока кнопка не нажата, благодаря резистору, подтягивающему уровень на контакте к земле. Когда кнопка нажата, на контакте появляется высокий уровень (логическая единица), что используется для обнаружения события нажатия.

Микропрограмма на контроллере обрабатывает это изменение уровня сигнала. В начале работы пин настроен на приём сигнала от кнопки, и активируется встроенный светодиодный индикатор. Также устанавливается последовательное соединение, которое позволяет обмениваться данными с компьютером через USB.

В основном цикле контроллер постоянно проверяет состояние сигнального контакта. Когда кнопка не нажата, на контакте удерживается низкий уровень, и контроллер остаётся в режиме ожидания. При нажатии кнопки сигнал меняется на высокий уровень, и контроллер выполняет заданную последовательность действий: отправляет в последовательный порт сообщение «Received», указывая на регистрацию события. Одновременно включается встроенный светодиод, предоставляя пользователю визуальный индикатор нажатия. Светодиод остаётся активным на одну секунду, а затем выключается. После этого контроллер делает паузу на три секунды перед следующим циклом проверки.

Данная схема позволяет регистрировать нажатия кнопки, подтверждать их визуально и отправлять данные на компьютер для дальнейшего использования в алгоритме обучения.

Пример изображения, полученного с камеры, показан на рис. 2.

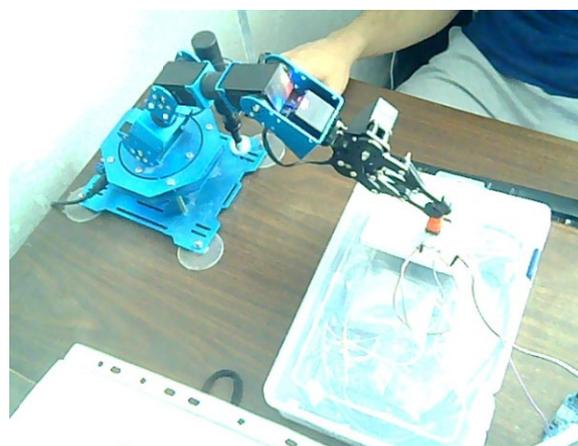


Рис. 2. Возможный вид с камеры установки для одноступенчатого решения

Непосредственно перед нажатием на кнопку робот занимает положение, при котором конец захвата находится на высоте 5-10 мм над кнопкой. Задача алгоритма обучения заключается в том, чтобы определить, находится ли кнопка под концом захвата или нет. В процессе обучения кнопку можно смещать.

Это позволяет имитировать практическую ситуацию, когда робот может перемещаться к различным объектам манипуляции, в результате чего объект может находиться в произвольном положении относительно робота, только в данном случае мы перемещаем не самого робота, а объект. Наличие на столе других предметов, положение полки с клавиатурой и человека за столом или его отсутствие создают шум, который в данном случае алгоритм должен обучиться игнорировать.

Определим тип и гиперпараметры модели, которые могут дать удовлетворительные результаты в данном сценарии.

Для данной задачи классические методы машинного обучения, такие как SVC, наивный Байес или логистическая регрессия, подходят очень плохо. Эти методы обучения требуют предварительного выделения параметров [10, 11], значения которых подаются на вход классификатора, а с необработанными данными работают плохо. Трудно выделить такой набор параметров изображения, который будет нести информацию о правильном позиционировании. Например, если использовать яркость в качестве параметра, то она меняется в зависимости от освещения комнаты значительно больше, чем от позиции манипулятора и кнопки. Выделение контуров хорошо проявляет себя в ситуации, где важна форма объектов и само их наличие [12]. В нашем случае наличие объекта на изображении не требует определения — кнопка и манипулятор всегда присутствуют. Но для использования этого метода пришлось бы задавать начальные позиции кнопки и манипулятора вручную, что может дать хорошие результаты, только если манипулятор или кнопка не сместятся от исходных позиций больше, чем на собственный размер, иначе будет выделен контур совсем другого элемента изображения. Поэтому в качестве модели было решено использовать сверточную нейронную сеть, так как именно этот метод хорошо работает с необработанными данными [11].

Было установлено, что различить кнопку и манипулятор достаточно четко можно, если разрешение изображения составляет не менее 256x256 пикселей. При меньшем разрешении

даже человек не всегда может отличить позицию попадания от позиции промаха. Поэтому вход сети будет состоять из 256x256x3 значений нормализованной яркости каждого цвета пикселя. Для того, чтобы такое количество параметров обработать, была построена следующая конфигурация сети (рис. 3):

- Входной слой: изображения размером 256×256 пикселей с 3 цветовыми каналами (RGB).
- Конволюционные блоки:
 - Первый блок:
 - Первый свёрточный слой с 32 фильтрами.
 - Второй свёрточный слой с 32 фильтрами.
 - Слой MaxPooling (2×2).
 - Второй блок:
 - Первый свёрточный слой с 64 фильтрами
 - Второй свёрточный слой с 64 фильтрами.
 - Слой MaxPooling (2×2).
 - Третий блок:
 - Первый свёрточный слой с 128 фильтрами.
 - Второй свёрточный слой с 128 фильтрами.
 - Слой MaxPooling (2×2).
- Глобальная агрегация: После блоков применяется слой GlobalAveragePooling2D, который преобразует пространственные признаки в одномерный вектор.
- Полносвязные слои:
 - Первый полносвязный слой с 128 нейронами (ReLU), за которым следует dropout (коэффициент 0.3) для борьбы с переобучением.
 - Второй полносвязный слой с 64 нейронами (ReLU) с дополнительным dropout.
- Выходной слой: Финальный Dense слой с 2 нейронами и активацией softmax для выполнения бинарной классификации.

Модель построена из серии блоков, каждый из которых состоит из двух последовательных свёрточных слоев с активацией ReLU и same-паддингом, за которыми следует слой MaxPooling для уменьшения размерности.

Для создания тестовых данных был создан датасет, состоящий из 134 изображений, 66 примеров промаха и 68 — попадания. Создание датасета выполнялось запуском робота, который выполнял наведение и нажатие на кнопку. В случае, если кнопка была нажата и от контроллера кнопки поступал сигнал Received, изображение с камеры непосредственно перед нажатием сохранялось в папку good, иначе — в папку bad. Между включениями камеры плата с кнопкой перемещалась, чтобы создать ситуации как с попаданием, так и с промахом. Для создания такого датасета потребовалось 40 минут времени, так как 10 циклов работы робота занимают 3 минуты 2 секунды.

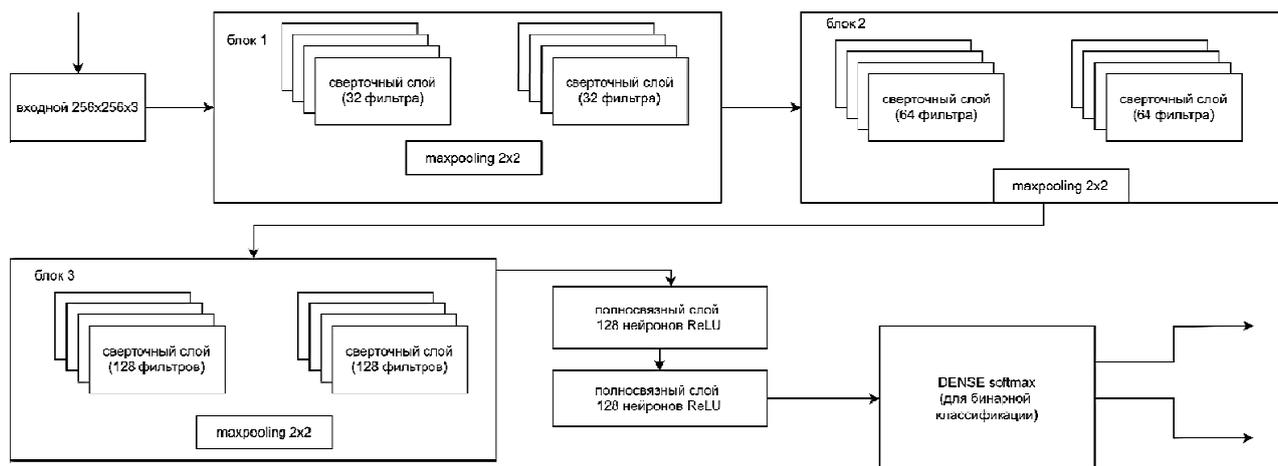


Рис. 3. Схема нейронной сети для одноступенчатого обучения

Создание большого датасета могло бы быть возможным, но заняло бы намного больше времени, а это может быть неприемлемо в практическом применении, так как такое обучение потребуется для каждого изменения в технологическом процессе.

Обученная на таких данных модель с разбиением на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80:20 дает точность 40.74 %, что даже хуже, чем 50 %, которые получаются при случайном угадывании.

Можно сделать вывод, что обучение в одну ступень сложной модели не является эффективным подходом, так как требует создания особенно большого набора данных, что занимает длительное время, и даже тогда даёт невысокую точность.

Вместо этого имеет смысл сначала с помощью одной модели выделить на изображении область, где находятся релевантные данные, а именно захват робота и кнопка, а затем с помощью другой модели по этой области оценить необходимость корректировки. Обе эти модели в сумме могут иметь меньше элементов, чем модель для одноступенчатого решения. Соответственно, их обучение потребует меньшего объема обучающих данных.

Трехступенчатое решение задачи определения необходимости корректировки

Для решения третьего этапа задачи определения необходимости корректировки надо выполнить первые два этапа, то есть вырезать правильную часть изображения и обработать её, устранив различия, вызванные разницей в освещении и отраженным светом от других объектов. Однако необходимые параметры та-

кой обработки зависят от возможностей классификатора, используемого на третьем этапе. Таким образом имеет смысл сначала решить задачу третьего этапа в предположении, что первые два уже выполнены. Чтобы правдоподобно имитировать решение первых двух этапов, было решено построить специальный стенд, который минимизирует различия в освещении и упрощает кадрирование за счет фиксации положения камеры (рис. 4).

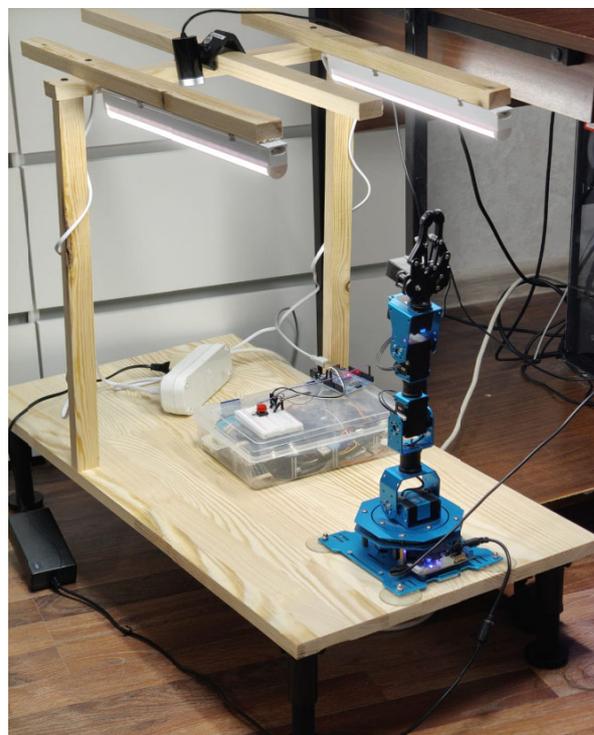


Рис. 4. Стенд для обучения третьего этапа

Стенд создает равномерное освещение области вокруг кнопки. Также в поле зрения камеры отсутствуют какие-либо посторонние

объекты, а её положение зафиксировано, поэтому кадрирование может быть сделано статическим. Таким образом, выполнение двух первых этапов в условиях стенда становится тривиальным, и можно сосредоточиться на третьем этапе — определении необходимости корректировки по предварительно обработанному и кадрированному изображению. Пример изображения с камеры приведен на рис. 5.

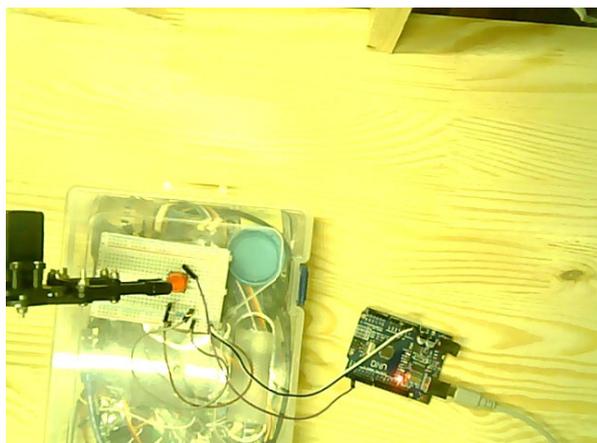


Рис. 5. Изображение с камеры на стенде

Фиксированное положение камеры позволяет провести фиксированное кадрирование. Область кадрирования далее можно масштабировать до 128×128 пикселей, и использовать эти

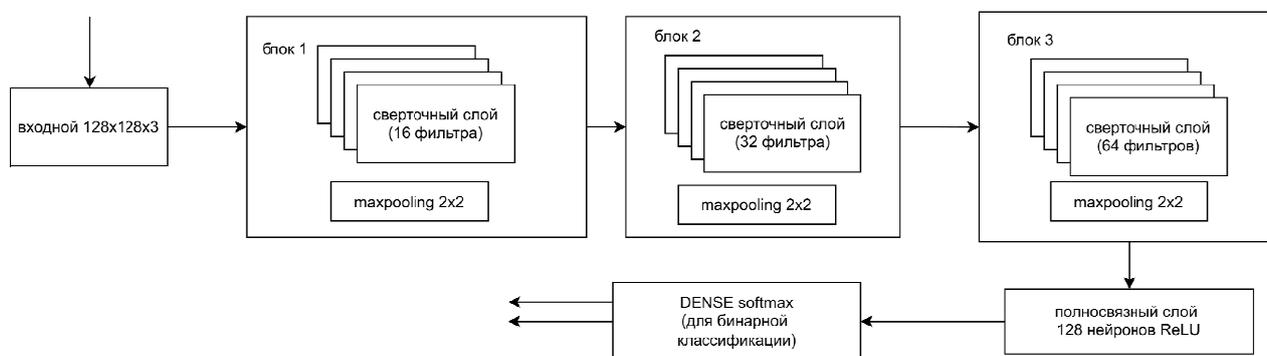


Рис. 6. Схема нейронной сети для третьей ступени трехступенчатого обучения

Такая модель, обученная на датасете из 130 изображений, даёт точность 84 % на тестовых данных. Во время практических испытаний, когда кнопка перемещалась так, что манипулятор или доставал до неё, или промахивался, модель позволяла определить, когда следует попытаться нажать на кнопку, а когда — пропустить.

Выводы

Доказано, что задача корректировки положения робота-манипулятора с помощью ма-

шинного обучения может быть упрощена при помощи разбиения на элементарные подзадачи.

- Входной слой: изображения размером 128×128 пикселей с 3 цветовыми каналами (RGB).
- Свёрточные слои:
 - Первый свёрточный слой: 16 фильтров с ядром 3×3 , функция активации ReLU, использование same-паддинга. За ним следует слой MaxPooling с окном 2×2 , уменьшающий размерность признаков.
 - Второй свёрточный слой: 32 фильтра (то есть, в два раза больше, чем в первом слое) с ядром 3×3 , ReLU и same-паддинг. После него также применяется слой MaxPooling 2×2 .
 - Третий свёрточный слой: 64 фильтра с ядром 3×3 , ReLU и same-паддинг.
- Глобальная свёрточная агрегация: После свёрточных слоев применяется слой GlobalAveragePooling, который сводит пространственные признаки к вектору фиксированной длины.
- Полносвязный слой: Один Dense слой с 32 нейронами (ReLU) с последующим применением dropout (коэффициент 0.2) для регуляризации.
 - Выходной слой: Dense слой с 2 нейронами и функцией активации softmax, обеспечивающий бинарную классификацию.

шинного обучения может быть упрощена при помощи разбиения на элементарные подзадачи. При обучении для каждой подзадачи (этапа) используется своя модель. Гиперпараметры модели каждого этапа подбираются независимо от других моделей; подбор параметров начинается с последнего этапа.

Получена близкая к оптимальной декомпозиция задачи нажатия на кнопку — разделение на пять этапов, три из которых планируется выполнить при помощи машинного обучения.

Представлено обучение модели последнего, третьего этапа.

Рекомендован подбор гиперпараметров модели каждого этапа независимо от других моделей. При этом подбор параметров начинается с последнего этапа, что позволит в дальнейшем решить и остальные подзадачи.

Литература

1. King P. ArmPi FPV AI Vision review // The MagPi Magazine. 2024. № 151. URL: <https://magazine.raspberrypi.com/articles/armpi-fpv-ai-vision-review> (дата обращения: 07.04.2025)
2. Колегаев В.В. Управление роботизированной рукой на основе компьютерного зрения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 3. С. 189-192.
3. Юревич Е.И. Сенсорные системы в робототехнике: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 100 с.
4. IDS Imaging Development Systems GmbH. Adaptive Automation with Ensenso X // [ids-imaging.com](https://en.ids-imaging.com/newsroom-news-article/adaptive-automation-ensenso-x.html). 2023. URL: <https://en.ids-imaging.com/newsroom-news-article/adaptive-automation-ensenso-x.html> (дата обращения: 19.06.2025).
5. Першина Ж.С., Каздорф С.Я., Лопота А.В. Методы визуальной навигации мобильного робота и построения картографических моделей внешней среды // Автоматизация. 2019. Т. 55. № 2. С. 92-102.
6. Кошелев П.Е., Юев А.А., Коноплев Ю.В. Применение системы технического зрения, реконструирующей трехмерную форму объектов космической техники // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23. № 1. С. 8-20.
7. ВиТэк. Что такое машинное зрение: функции, задачи и практические примеры применения на производствах // Vitec.ru. 2015. URL: <https://www.vitec.ru/znaniya/articles/prakticheskie-voprosi-primeneniya-teh-zreniya/> (дата обращения: 07.04.2025).
8. Галимова М.В., Золотухин К.В. Оценка качества бинарных классификаторов с использованием AUC-ROC // Системный анализ и логистика. 2024. № 3(41). С. 10-16.
9. Наталенко Д.Н. Влияние предварительной обработки изображений на точность распознавания диких животных // Решетневские чтения: материалы XXVIII Международного генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2024. Ч. 2. С. 326-328.
10. Параскевопуло К.М., Наркевич А.Н., Гржибовский А.М. Применение математической модели логистической регрессии для распознавания злокачественных новообразований на цифровых изображениях кожи // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10(82). С. 94-100.
11. Андриянов Н.А., Дементьев В.Е., Ташлинский А.Г. Обнаружение объектов на изображении: от критериев Байеса и Неймана-Пирсона к детекторам на базе нейронных сетей // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 1. С. 139-159.
12. Журавлев А.А. Сравнение эффективности классификации методов выделения контуров на примере изображений дорожного покрытия // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 1(61). С. 23-28.

Поступила 19.04.2025; принята к публикации 30.05.2025

Информация об авторах

Городилов Алексей Владиславович – канд. техн. наук, доцент института системной и программной инженерии и информационных технологий, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоградский административный округ, пл. Шокина, д. 1), тел.: +7 (926) 225-68-95, e-mail: kaverina@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2887-8547>

Кононова Александра Игоревна – д-р физ.-мат. наук, профессор института системной и программной инженерии и информационных технологий, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоградский административный округ, пл. Шокина, д. 1), тел.: +7 (985) 148-32-64, e-mail: illinc@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4178-3828>

ADJUSTING ROBOT MANIPULATOR OPERATIONS USING THIRD-PERSON MACHINE VISION

A.V. Gorodilov, A.I. Kononova

National Research University «Moscow Institute of Electronic Technology», Moscow, Russia

Abstract: we considered a methodology for adjusting the operations of a robotic manipulator using third-person machine vision. We described the main challenges associated with cameras mounted directly on the manipulator, as well as the advantages of positioning the camera independently from the robot. The study focuses on determining whether adjusting the robot's position is necessary before performing the target action. Pressing a button serves as the test scenario. We proposed a multi-stage image-processing pipeline, comprising preprocessing, key-feature extraction, and classification via convolutional neural networks. We evaluated probabilities of a successful press and of a miss for the proposed method. We developed and described a test rig used in the experiments. We detailed the architecture and hyperparameters of the neural network both for a single-stage solution and for the third stage of the proposed three-stage approach. Experiments confirm the effectiveness of the method, demonstrating that breaking the task into multiple stages improves model accuracy and reduces computational cost. The proposed methodology enhances the flexibility and adaptability of manipulators when interacting with objects by reducing reliance on precise initial calibration and minimizing the need for manual intervention

Key words: manipulator, vision, neural-networks, correction, images

References

1. King P. “ArmPi FPV AI Vision review”, *The MagPi Magazine*, 2024, no. 151, available at: <https://magazine.raspberrypi.com/articles/armpi-fpv-ai-vision-review> (date of access: 07.04.2025)
2. Kolegaev V.V. “Computer vision-based control of the robotic arm”, *Mechatronics, Automation, Control (Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie)*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 189-192.
3. Yurevich E.I. “Sensory systems in robotics” (“Sensornye sistemy v robototekhnike”), textbook, St.-Petersburg, 2013, 100 p.
4. “IDS Imaging Development Systems GmbH. Adaptive Automation with Ensenso X”, [ids-imaging.com](https://en.ids-imaging.com/newsroom-news-article/adaptive-automation-ensenso-x.html), 2023, available at: <https://en.ids-imaging.com/newsroom-news-article/adaptive-automation-ensenso-x.html> (date of access: 19.06.2025)
5. Pershina Zh.S., Kazdorf S.Ya., Lopota A.V. “Methods of visual navigation of a mobile robot and construction of cartographic models of the external environment”, *Autometriya*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 92-102.
6. Koshelev P.E., Yuev A.A., Konoplev Yu.V. “Application of the computer vision system reconstructing the three-dimensional form of space technology objects”, *Siberian Aerospace Journal (Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal)*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 8-20.
7. Vitek, “What is machine vision: functions, tasks, and practical examples of industrial applications”, 2015, available at: <https://www.vitek.ru/znaniya/articles/prakticheskie-voprosi-primeneniya-teh-zreniya/> (date of access: 07.04.2025)
8. Galimova M.V., Zolotukhin K.V. “Quality assessment of binary classifiers using AUC-ROC”, *System Analysis and Logistics (Sistemnyy analiz i logistika)*, 2024, no. 3(41), pp. 10-16.
9. Natalenko D.N. “The influence of image pre-processing on the accuracy of wild animal recognition”, *Reshetnev readings: Proc. of the XXVIII Int. Sci.-Prac. Conf., Dedicated to the 100th Anniversary of the Birthday of the General Designer of Rocket and Space Systems, Academician Mikhail Reshetnev, Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after academician. M.F. Reshetnev*, 2024, pp. 326-328.
10. Paraskevopulo K.M., Narkevich A.N., Grzhibovskiy A.M. “Application of mathematical model of logistic regression for recognition of malignant neoplasms on digital images of skin”, *Engineering Bulletin of the Don (Inzhenernyy vestnik Dona)*, 2021, no. 10(82), pp. 94-100.
11. Andriyanov N.A., Dement'ev V.E., Tashlinskiy A.G. “Detection of objects in the images: from likelihood relationships towards scalable and efficient neural networks”, *Computer Optics (Komp'yuternaya optika)*, 2022, vol. 46, no. 1, pp. 139-159.
12. Zhuravlev A.A. “Comparison of the classification efficiency of the contour detection methods on the example of road surface images”, *XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus (XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashhego plyus)*, 2023, vol. 12, no. 1(61), pp. 23-28.

Submitted 19.04.2025; revised 30.05.2025

Information about the authors

Aleksey V. Gorodilov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University «Moscow Institute of Electronic Technology» (1 Shokin Square, Zelenograd 124498, Moscow, Russia), tel.: +7 (926) 225-68-95, e-mail: kaverina@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2887-8547>

Aleksandra I. Kononova, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University «Moscow Institute of Electronic Technology» (1 Shokin Square, Zelenograd 124498, Moscow, Russia), tel.: +7 (985) 148-32-64, e-mail: illinc@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4178-3828>

ГОЛОСОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ В T-FLEX CAD КАК ИНСТРУМЕНТ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

И.М. Пахомов, А.В. Козлова

Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва, Россия

Аннотация: внедрение голосового управления в САПР-системы (системы автоматизированного проектирования) является важным шагом для развития способов взаимодействий человека с интерфейсом машины (программного обеспечения) для задач Индустрии 4.0. Рассматриваются такие элементы, как разработка и практическое применение приложения, обеспечивающего голосовое управление в системе T-FLEX CAD (computer-aided design), основным направлением которого является оптимизация процессов проектирования. Исследуется доказательство того, что голосовое управление различными функциями программного обеспечения не только улучшает эргономические свойства взаимодействия пользователя с системой, но и способствует сокращению временных затрат в рамках автоматизации технологических процессов. Описана архитектура системы, которая объединяет методы взаимодействия модулей распознавания речи, встроенными алгоритмами системы шумоподавления и обработки команд с помощью технологий распознавания естественного языка с встроенным в T-FLEX CAD модулем API (application programming interface – программный интерфейс приложения) для запуска распознанных функций, изменения их параметров и дальнейшего взаимодействия с ними. Полученные результаты могут быть использованы для развития цифровых производственных технологий, которые в перспективе могут быть доработаны использованием алгоритмов искусственного интеллекта для предложения спрогнозированных команд в зависимости от пользовательского проекта. Результаты исследования являются актуальными для всех предприятий, заинтересованных во внедрении улучшений, и могут быть адаптированы для иных популярных САД-систем, так как многие из них построены по схожему принципу взаимодействия и разработки конструкторской документации

Ключевые слова: автоматизация проектирования, голосовое управление, системы распознавания речи, API

Введение

В настоящее время существует тенденция проведения радикальных трансформаций различных процессов проектирования, разработок, расчетов и управления, существующая на большинстве современных промышленных предприятиях в рамках стремления проведения перехода к концепции Индустрии 4.0. Цифровизация различных процессов производства, введение интернета вещей (Internet of Things), внедрение алгоритмов искусственного интеллекта требуют кардинального переосмысления стандартных методов и традиционных средств взаимодействия человека с автоматизированными системами проектирования, производства, управления данными и жизненным циклом изделия [1]. Одно из самых важных мест в контексте автоматизированных систем играет САД-система, так как именно эта система является основным инструментом любого инженера для создания конструкторской документации, ее корректного и доступного оформления под любой международный стандарт. Однако, узким местом систем автоматизированного проектирования остается единственный возмож-

ный вариант взаимодействия пользователя со средой путем использования стандартных периферийных устройств (мышь и клавиатура), ограничивающий скорость последовательного и переменного использования различных функций, вызываемых инженером.

В процессе развития всех используемых компьютерных систем и совершенствования технологий возрастает сложность проектов, они становятся более наполненными различными компонентами, количество которых может достигать тысячи, что без сомнений увеличивает нагрузку на инженеров-конструкторов, требует ускорения вызова и описания часто используемых функций, например, при создании эскизов, простановки размеров, перемещения и вращения элементов. В дополнение к этому, при подобном длительном использовании исключительно стандартных периферийных устройств вероятно возникновение различных профессиональных заболеваний, таких как туннельный синдром, связанный с неизбежным неправильным использованием устройства ввода (мыши), снижение остроты зрения из-за чрезмерной концентрации на ограниченном пространстве, возникновения слепых участков.

Актуальность внедрения голосового управления в САД-системы подтверждается интересом научного сообщества к этой темати-

ке. Существует несколько работ, в которых рассматривались различные подходы к интегрированию речевых интерфейсов:

- С. Сюэ, Х. Ю. Коу и С. Т. Тан описывают поддержку естественного голоса и свободной формулировки команд [2];

- Х. Ю. Коу и С. Т. Тан утверждают, что значительно сокращается время ввиду полного отказа от устройств ввода (мышь) [3];

- Амар Кумар Бехера, Элисон Маккей все предложили решение, которое сочетает в себе не только голосовой ввод, но и вывод информации о деталях сборки в системе SolidWorks [4].

Большинство подобных исследований отлично демонстрируют, насколько меньше задействуется мышь, однако не показывают, насколько данная разработка действительно применима инженерами-конструкторами.

Несмотря на то, что многие ученые подходят к вопросу о разработке подобных систем, все они, в основном, англоязычные и реализованы в зарубежных САД-системах, что, соответственно, сильно ограничивает их использование российскими инженерами. Кроме того, остается открытым вопрос о шумоподавлении.

Исходя из анализа проделанных научных работ, можно сказать об особой актуальности данной работы в российском научном и инженерном сообществе, так как система T-FLEX CAD активно используется на российских предприятиях и учебных заведениях, особенно в условиях импортозамещения. Разработка программного обеспечения с поддержкой русского языка, адаптация системы к производственному шуму требуют отдельного подхода, особенно в виде интеграции с API T-FLEX CAD.

Цель исследования заключается в создании и проверки работоспособности голосового интерфейса, позволяющего управлять функциями T-FLEX CAD с помощью голоса инженера-конструктора, что должно повысить удобство взаимодействия с интерфейсом и автоматизировать рутинные операции.

Перед исследованием были поставлены следующие задачи:

1) разработать архитектуру программного решения, обеспечивающего последовательную работу модуля записи и обработки аудиосигнала, распознавания речи, обработки команд и взаимодействия с САД-системой;

2) реализовать прототип программного обеспечения, взаимодействующего с функциями T-FLEX CAD;

3) выполнить тестирование разработки и по его итогу провести сравнение времени вы-

полнения операций ручным и голосовым способом.

Описание алгоритма

Алгоритм системы голосового управления для системы автоматизированного проектирования T-FLEX CAD (рис. 1) рассматривается как программное обеспечение, которое состоит из нескольких различных модулей, каждый отвечает за свою определенную роль [5], [6].

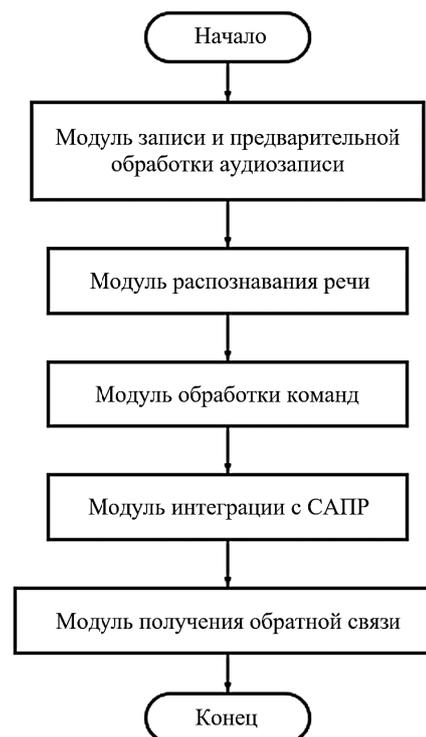


Рис. 1. Алгоритм управления системой автоматизированного проектирования голосом

1. Модуль записи и предварительной обработки аудиозаписи.

Работа данного модуля заключается в использовании устройства записи – микрофона. Для качественной работы программного обеспечения будет критическим выбор микрофона с высокой чувствительностью и направленной диаграммой с функцией активного шумоподавления именно для того, чтобы минимизировать объем фоновых шумов, посторонних звуков, а также для увеличения качества распознавания речи.

В качестве программной предварительной обработки и очистки записи от нежелательных шумов для увеличения качества распознавания речи предполагается использовать алгоритм Винера [7]. Алгоритм подразумевает анализ записи и разделяет его на полезный сигнал, которым является голос пользователя, и шумы –

сторонние звуки, эхо в помещении или помехи. Разделение происходит путем анализа шумных участков записи, где нет человеческого четкого голоса и устраняет схожие сигналы на фоне участков с голосом пользователя [8]. В результате данной обработки программа получает запись, очищенную от различных посторонних звуков, что помогает распознавать команды на следующем этапе.

Дополнительно можно рассмотреть техническую возможность оснащения производственного кабинета специальными материалами, поглощающими сторонние звуки и шумы, а также размещения микрофона ближе к пользователю. Полученная аудиозапись сохраняется в оперативную память, а также файловую систему с указанием основных параметров записи: дата, время, длительность записи.

2. Модуль распознавания речи.

Для распознавания речи сначала применяется модель, которая выполняет функцию преобразования последовательности звуков в слова. Модель должна быть обучена на разных языках, включая русский и английский, так как такое программное обеспечение как САД-система может иметь мультязычные команды. Также существует множество готовых моделей, которые имеются в общем доступе. Они могут быть как облачными, например «Yandex SpeechKit», так и офлайн-моделями для более удобной интеграции в различное программное обеспечение, например «Vosk API» [9]. Грамматика команд имеет различные технические термины, такие как «Вытalkingвание», «Массив», «Концентричность». Данные распознавания сохраняются в текстовом формате и направляются для обработки следующим модулем.

3. Модуль обработки команд.

Данный модуль отвечает за определение из текстовой расшифровки звукозаписи определенных команд и ее параметров. Для точной работы и функционирования данного модуля необходимо четко определить, какими словами будет вызываться каждая программируемая функция. Разработчики САД-системы продумали эффективные и уникальные названия для имеющегося набора команд, поэтому все голосовые вызовы будут иметь равные значения с фактическими названиями функций (например, при команде «Вытalkingвание» вызывается функция «Вытalkingвание»). На данном этапе сложность заключается в определении необходимых и достаточных параметров для каждой функции, их обозначения или же подготовки к функции. Например, для функции «Вытalkingва-

ние» будет достаточным определение направления и величины вытalkingвания, для функции «Булева» — обозначения номеров тел для сложения и вычитания, для функции «Концентричность» более удобным и простым способом будет выбрать вручную окружности и вызвать голосом команду. Для точного распознавания команд и разделения записи на команду и параметры нужно прописать использования модели парсинга, основанной на машинном обучении, такой как Apache OpenNLP. Это поможет распознавать сложные конструкции похожие на «Фаска 2 мм к последнему ребру».

Пример кода команды создания фаски:

```
edge.ApplyChamfer(
    size: chamferSize, // Величина фаски в мм
    angle: 45.0, // Угол 45° - по умолчанию
    flipDirection: false
);
```

4. Модуль интеграции с САПР.

Данный модуль отвечает за преобразование распознанных команд в операции, понятные и определяемые в T-FLEX CAD, используя API для работы с ним.

Первым делом модуль должен определить наличие связи с запущенным документом САПР. Если же документ закрыт, то необходимо вывести сообщение с уведомлением.

Вторым этапом является запуск определенного сценария в зависимости от распознанной команды и трансформация параметров операции в параметры функции.

Параллельно с каждым из этапов необходимо записывать текстовый документ с указанием временных промежутков, этапа операции и счетчика возникнувших ошибок в процессе выполнения сценариев.

Процесс подсчета ошибок необходимо ввести практически в каждое действие. Особенно это полезно на этапе разработки и отладки программного дополнения.

5. Модуль обратной связи.

В случае успешного программного выполнения сценария необходимо воспроизвести данную операцию на экране и оповестить пользователя звуковым или световым сигналом о завершении выполнения операции и ожидания получения следующей команды. В качестве примера индикацией выполнения может быть отдельно выделенная лампа завершения выполнения функции, описанная в САПР, либо синтезированное аудиосообщение со словами «Отверстие создано», «Объект выдавлен», «Отрезки равны».

Тестирование и результаты

По итогу завершения разработки программного дополнения тестирования руками разработчиков выявлена необходимость корректировки малых недочетов, несоответствий распознавания, дополнительного обучения моделей.

Для более детального тестирования необходимо собрать группу для начала из минимум 20 инженеров-конструкторов, студентов, которые используют T-FLEX CAD в своей профессиональной деятельности или в процессе обучения. Необходимо разработать план проведения тестирования. Для тестирования лучшим способом будет реальное построение модели, заключающееся в частом использовании рутинных функций и иных функций, которые программировались для голосового распознавания, использование различных конфигураций

и построение сборок с функциями задания сопряжений, перемещений и вращений.

Необходимо выделить помещение для тестировщиков, в котором будут выполнены все условия для точной записи звуковых дорожек с минимизацией помех. В дальнейшем можно повторить тестирование в шумном производственном помещении, а также с использованием более простых микрофонов.

Для снятия метрик в программном обеспечении предусмотрено сохранение времени выполнения обработки голосового ввода от окончания озвучивания команды до полного завершения ее результата. Также, для контроля, сравнения и выявления не измеряемых программой данных были привлечены 5 человек для проведения выборочных замеров случайных операций у случайных тестировщиков.

Проведя анализ, получили следующие данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение времени, затрачиваемое на операции

Название операции	Время, с (замер выполнялся с момента поступления команды до ее результата, используя только ручные периферийные устройства)	Время, с (замер совместного использования периферийных устройств ввода и голосовых команд)	Точность вызова функции, %
Отрезок длиной 50 из точки (0;0) в точку под 45	8,4	8,3	87
Окружность диаметр 45 в точке (54;105)	14,2	7,7	83
Прямоугольник от точки (20;20), длина 500, высота 350	18,5	8,9	94
Совпадение выбранных элементов	4,5	7,2	89
Параллельность выбранных элементов	5,5	8,4	92
Концентричность выбранных элементов	5,7	7,6	78
Коллинеарность выбранных элементов	5,5	8,2	75
Фиксация выбранных элементов	7,6	7,3	86
Касание выбранных элементов	7,6	7,5	95
Равенство выбранных элементов	7	7,8	78
Выталкивание профиля 4 вверх на 24 миллиметра	8,3	6,5	96
Вращение профиля 2 на 135	6	5,1	98
Булева вычесть тело 1 из тело 2	7,8	5,5	95

По итогу проведения тестирования и снятым метрикам можно сделать некоторые выводы.

Некоторые функции, запускаемые в режиме голосового управления, уменьшают время выполнения необходимой операции с указанием параметров на 50 %. Данное сокращение особенно видно на построении прямоугольников и окружностей именно из-за того, что в CAD-системах, чтобы определить параметры фигуры, необходимо изменять их при построе-

нии в разделе параметров либо устанавливать им управляющие размеры.

В остальном, именно сочетание использования периферийных устройств и голосового вызова команды часто сокращает выполнение операций примерно на 15 %.

Функции, запускающие сопряжения элементов, быстрее использовать в режиме без голосового управления, так как запуск осуществляется двумя нажатиями на устройство ввода и

выбором необходимых элементов. Для профессионала, использующего CAD-систему, это привычные и быстрые действия.

Заключение

В заключение можно сказать, что данная разработка имеет потенциал для совершенствования. Необходимо проработать процесс обозначения абсолютно каждой функции, сделать ее простой для вызова, не тратя время на длительные названия и большое количество слов, удаление лишних слов. Важно подобрать вызов команды и обозначение ее параметров так, чтобы не тратилось время на обозначение лишних связывающих слов, единиц измерений.

В перспективе для улучшения обработки и выполнения команд можно рассмотреть внедрение искусственного интеллекта, который будет иметь возможность анализа моделируемого проекта, предугадывания и прогнозирования следующих функций и предлагать их в специальном окне либо голосом. Также можно продолжить обучение модели распознавания на более большом объеме данных, что позволит более точно и быстрее распознавать необходимые параметры, уменьшит время выполнения одной и той же операции. В любом случае профессионал, который регулярно использует CAD-системы в своей работе, готов быстро взаимодействовать с любой функцией, особенно рутинной, это будет быстрее любого произнесения исключительно из-за времени движения руки и четкого произнесения технического термина. Вероятно, стоит сделать акцент на функциях, скрытых в подменю либо редко используемых, так как в таком случае пользователь потратит больше времени на поиск функции, чем на вызов голосом. Помимо этого, функцию голосового управления можно улучшить путем разработки мобильного приложения для управления производством при использовании голоса.

Хотя в данной работе голосовое управление разрабатывалось именно для T-FLEX CAD, сама архитектура системы является достаточно универсальной. Благодаря модульному подходу и использованию стандартных методов интеграции через API, её можно адаптировать и к другим зарубежным CAD-программам, таким как SolidWorks, Autodesk Fusion 360, FreeCAD и другим системам, где предусмотрена возможность программного доступа к функциям. Во многих популярных платформах уже реализованы механизмы вызова команд, изменения параметров и

отслеживания состояния проекта, что делает перенос решения технически осуществимым.

Конечно, для этого потребуется доработать модуль обработки команд с учётом особенностей конкретной системы и составить словарь голосовых фраз, соответствующий её командам. Тем не менее, предложенный подход может стать основой для создания голосового управления и в других инженерных системах.

Выводы

По итогу исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработана и реализована модульная система голосового управления для T-FLEX CAD.
2. Интегрированы ключевые команды создания эскизов, наложения сопряжений и параметрического моделирования.
3. Доказано результатами пользовательского тестирования сокращение времени выполнения некоторых рутинных операций до 22 %, а также сохранение средней точности распознавания команд на уровне не ниже 86 % при допустимом минимуме в 75 % в условиях рабочего шума.
4. Обоснована целесообразность применения голосового интерфейса в CAD-средах, имеющих открытую архитектуру и API, по аналогии с T-FLEX CAD, что позволяет рассматривать возможность масштабирования подхода на другие системы при условии адаптации команд и интерфейса.

Литература

1. Курейчик В.М., Тарасов В.Б. Введение в интеллектуальные системы автоматизированного проектирования // Известия ТРТУ. Технологический институт ФГБОУ ВПО «Южный федеральный университет» в г. Таганроге. Таганрог, 1997. С. 41-49.
2. Xue H., Kou Z., Tan S.K. Natural voice-enabled CAD: modeling via natural discourse // Computer-Aided Design and Applications. 2009. Vol. 6. № 1. Pp. 125-136.
3. Kou Z., Liu S., Tan S.K. Natural voice-enabled CAD modeling and its performance evaluation // Computer-Aided Design and Applications. 2008. Vol. 5. № 1-4. Pp. 266-277.
4. Behera A., McKay A. CAD model simplification using voice interaction for product lifecycle support // 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2017. Pp. 1715-1719.
5. О применении API T-FLEX CAD при разработке подсистемы автоматизированного проектирования раскроя материала // АО «Топ Системы», 2008. URL: <https://www.tfex.ru/about/publications/detail/index.php?ID=1514> (дата обращения: 23.11.2024).
6. Voice control for industrial applications // automationfair, 2022. URL: <https://www.automationfair.com/voice-control-for-industrial-applications/> (дата обращения: 18.01.2025).

7. Восстановление смазанных и расфокусированных изображений с помощью фильтра Винера. Реализация на C++ OpenCV // Хабр, 2018. URL: <https://habr.com/ru/articles/424987/> (дата обращения: 01.02.2025).

8. Meyer P., Elshami S., and Fingshaidt T. Reduction of Interference from Multichannel Speakers Using Adaptive

Filtering in the Frequency Domain // J AUDIO SPEECH MUSIC PROC. 2020, 14 (2020). URL: <https://asmp-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13636-020-00180-6> (дата обращения: 02.02.2025).

9. Alpha Cephei. VOSK Speech Recognition Toolkit. URL: <https://alphacephei.com/vosk/> (дата обращения: 02.02.2025)

Поступила 14.03.2025; принята к публикации 30.05.2025

Информация об авторах

Пахомов Илья Михайлович – аспирант, Московский государственный технологический университет «Станкин» (127055, Россия, г. Москва, Вадковский переулок, 3Ас1), e-mail: 190711@bk.ru, тел.: +7 (916) 869-42-72

Козлова Александра Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, Московский государственный технологический университет «Станкин» (127055, Россия, г. Москва, Вадковский переулок, 3Ас1), e-mail: a.kozlova@stankin.ru, тел.: +7 (929) 935-27-50

VOICE CONTROL IN T-FLEX CAD AS A TOOL FOR AUTOMATING DESIGN AND PRODUCTION PROCESSES

I.M. Pakhomov, A.V. Kozlova

Moscow State Technological University «Stankin», Moscow, Russia

Abstract: the integration of voice control in CAD systems (computer-aided design systems) represents a significant step in advancing human-machine interface interactions for Industry 4.0 applications. This paper examines elements such as the development and practical implementation of an application that provides voice control within the T-FLEX CAD system, with a primary focus on optimizing design processes. The objective of this study is to demonstrate that voice control of various software functions not only enhances the ergonomic aspects of user-system interactions but also contributes to reducing time expenditures in the automation of technological processes. The paper describes the system architecture that integrates speech recognition module interactions, embedded noise reduction and command processing algorithms utilizing natural language recognition technologies, along with the T-FLEX CAD API module to initiate recognized functions, modify their parameters, and facilitate further interactions. This article contributes to the advancement of digital manufacturing technologies, which may eventually be enhanced through the application of artificial intelligence algorithms to offer predicted commands based on the user's project. The findings of this study are relevant to all enterprises interested in implementing improvements and can be adapted for other popular CAD systems, as many of them are built on similar principles of interaction and design documentation development

Key words: design automation, voice control, speech recognition systems, API

References

1. Kureychik V.M., Tarasov V.B. "Introduction to Intelligent Systems for Computer-Aided Design", *News of TRTU (Izvestiya TRTU)*, Taganrog, 1997, pp. 41–49.
2. Xue H., Kou Z., Tan S. K. "Natural voice-enabled CAD: modeling via natural discourse", *Computer-Aided Design and Applications*, 2009, vol. 6, no. 1, pp. 125–136.
3. Kou Z., Liu S., Tan S. K. "Natural voice-enabled CAD modeling and its performance evaluation", *Computer-Aided Design and Applications*, 2008, vol. 5, nos. 1–4, p. 266–277.
4. Behera A., McKay A. "CAD model simplification using voice interaction for product lifecycle support", *25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2017, pp. 1715–1719.
5. "On the Application of the T-FLEX CAD API in the Development of an Automated Material Cutting Subsystem", *JSC Top Systems*, 2008, available at: <https://www.tflex.ru/about/publications/detail/index.php?ID=1514> (date of access: 23.11.2024).
6. "Voice control for industrial applications", *Automationfair*, 2022, available at: <https://www.automation-fair.com/voice-control-for-industrial-applications/> (date of access: 18.01.2025).
7. "Restoration of blurred and defocused images using the wiener filter. Implementation in C++ OpenCV", *Habr*, 2018, available at: <https://habr.com/ru/articles/424987/> (date of access: 01.02.2025).
8. Meyer P., Elshami S., Fingshaidt T. "Reduction of interference from multichannel speakers using adaptive filtering in the frequency domain", *J AUDIO SPEECH MUSIC PROC.*, 2020, no. 14, available at: <https://asmp-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13636-020-00180-6> (date of access: 02.02.2025).
9. Alpha Cephei, VOSK Speech Recognition Toolkit, available at: <https://alphacephei.com/vosk/> (date of access: 02.02.2025).

Submitted 14.03.2025; revised 30.05.2025

Information about the authors

Илья М. Пахомов, graduate student, Moscow State Technological University «Stankin» (3Ab1 Vadkovskiy lane, Moscow 127055, Russia), e-mail: 190711@bk.ru, tel.: +7 (916) 869-42-72

Aleksandra V. Kozlova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Moscow State Technological University «Stankin» (3Ab1 Vadkovskiy lane, Moscow 127055, Russia), e-mail: a.kozlova@stankin.ru, tel.: +7 (929) 935-27-50

ПРОБЛЕМАТИКА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В РАМКАХ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

С.С. Антипов, В.Л. Бурковский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается проблематика управления рисками в рамках строительного производства с использованием аппарата нечеткой логики. В условиях учета неопределённости, характерных для строительного бизнеса, возникает необходимость разработки эффективных инструментов анализа и прогнозирования рисков. Средства нечеткой логики позволяют учитывать субъективность оценок и сложность взаимодействия различных факторов риска, обеспечивая более гибкий подход к управлению. Проводится анализ процедуры идентификации основных видов рисков, характерных для строительных организаций, а также вопросов их качественной оценки с учетом мнений экспертов и реальных данных, формируемых в рамках аналогичных проектов. Для формализации процесса управления используются функции принадлежности, позволяющие перевести качественные характеристики рисков в комплексную систему. Кроме того, рассматривается процесс разработки моделей, позволяющих прогнозировать возможные сценарии развития событий с учетом влияния выявленных рисков. Данные модели строятся на правилах нечеткого вывода, которые учитывают множественность возможных исходов и степень уверенности в каждом из них. При этом важную роль играет разработка стратегии реагирования на риски, включающей меры по предотвращению негативных последствий и минимизацию ущерба

Ключевые слова: нечеткая логика, риски, процессы принятия решений, мониторинг данных, управление рисками

Введение

Строительная отрасль традиционно характеризуется высоким уровнем неопределённости и подвержена множеству рисков, связанных с финансовыми затратами, техническими сложностями, изменениями законодательства, колебаниями рыночных цен и многими другими факторами. Управление этими рисками становится важнейшей задачей руководителей строительных компаний, поскольку от эффективности принятых мер зависит успешность реализации проектов. Классические методы управления рисками, такие как вероятностный анализ или SWOT-анализ, хотя и полезны, часто оказываются недостаточными для обработки сложной и многогранной информации, связанной с проектами в строительстве. В этой статье мы рассмотрим возможность применения аппарата нечеткой логики для повышения точности и эффективности процесса управления рисками в строительном бизнесе.

Постановка задачи

Структура управления, изображённая на рис. 1, отражающая физическую структуру производственной системы строительной отрасли, представляет собой комплекс взаимосвязанных элементов, обеспечивающих выполнение строительных работ — от проектирования до ввода

объектов в эксплуатацию. Эта система включает различные уровни организации производства, начиная от отдельных рабочих мест и заканчивая крупными строительными организациями и холдингами.

Эффективность физической структуры производственной системы зависит от правильного взаимодействия всех её компонентов. Важнейшие принципы, лежащие в основе функционирования этой системы:

- Оптимизация логистических потоков: рациональное использование транспортных средств и маршрутов позволяет сократить затраты на транспортировку материалов и повысить скорость выполнения работ.

- Учет климатических условий: адаптация производственных процессов к погодным условиям региона помогает избежать задержек и повреждений конструкций

- Автоматизация и цифровизация: внедрение современных информационных технологий способствует улучшению координации между различными уровнями системы, повышению точности планирования и ускорению принятия решений.

- Соблюдение стандартов безопасности: обеспечение безопасности на строительных площадках является приоритетом, поскольку работа с тяжелыми машинами и высотными конструкциями требует строгого соблюдения норм охраны труда.

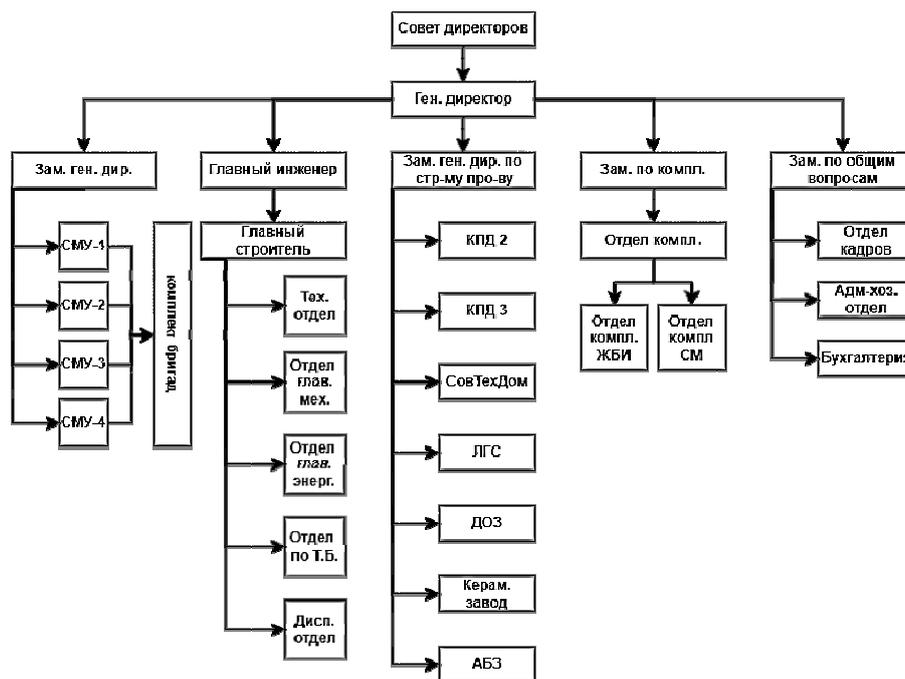


Рис. 1. Структура управления строительной компании

Чтобы производство функционировало стабильно, требуется качественная система материально-технического обеспечения (МТО), представленная на рис. 2. Данная схема подразумевает оперативное предоставление всех нужных ресурсов — начиная от исходного сырья и заканчивая запчастями и техникой. Качество функционирования подобной схемы определяется компетентностью закупочной деятельности, рациональным управлением запасами на складах и согласованностью взаимодействия

различных структурных подразделений организации. Немаловажным фактором является постоянный контроль ситуации на рынке поставщиков, позволяющий своевременно адаптироваться к колебаниям стоимости продукции и условиям доставки. Все перечисленные меры способствуют поддержанию непрерывности производственных процессов и снижению вероятности возникновения перерывов в работе, что непосредственно сказывается на финансовых результатах бизнеса.

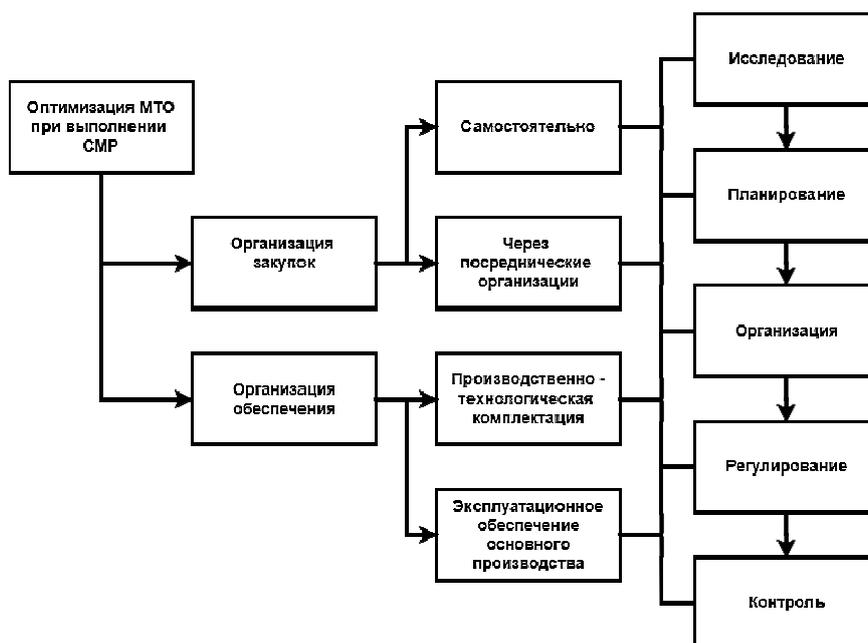


Рис. 2. Структура системы материально-технического обеспечения

Система МТО поддерживается комплексным механизмом организационного обеспечения, направленным на эффективное управление всеми основными процессами. Эта структура, изображенная на рис. 3, охватывает такие ключевые аспекты, как бюджетирование и финансовое планирование, обеспечение квалифицированными специалистами, обслуживание механического оборудования, контроль качества поступающих материалов и управление логисти-

ческими операциями. Важнейшими элементами являются автоматизация процессов учета и анализа данных, что позволяет своевременно выявлять узкие места и принимать обоснованные управленческие решения. Благодаря этому обеспечивается высокая степень гибкости производства и его адаптация к изменениям внешней среды, что является важным условием конкурентоспособности современного бизнеса.

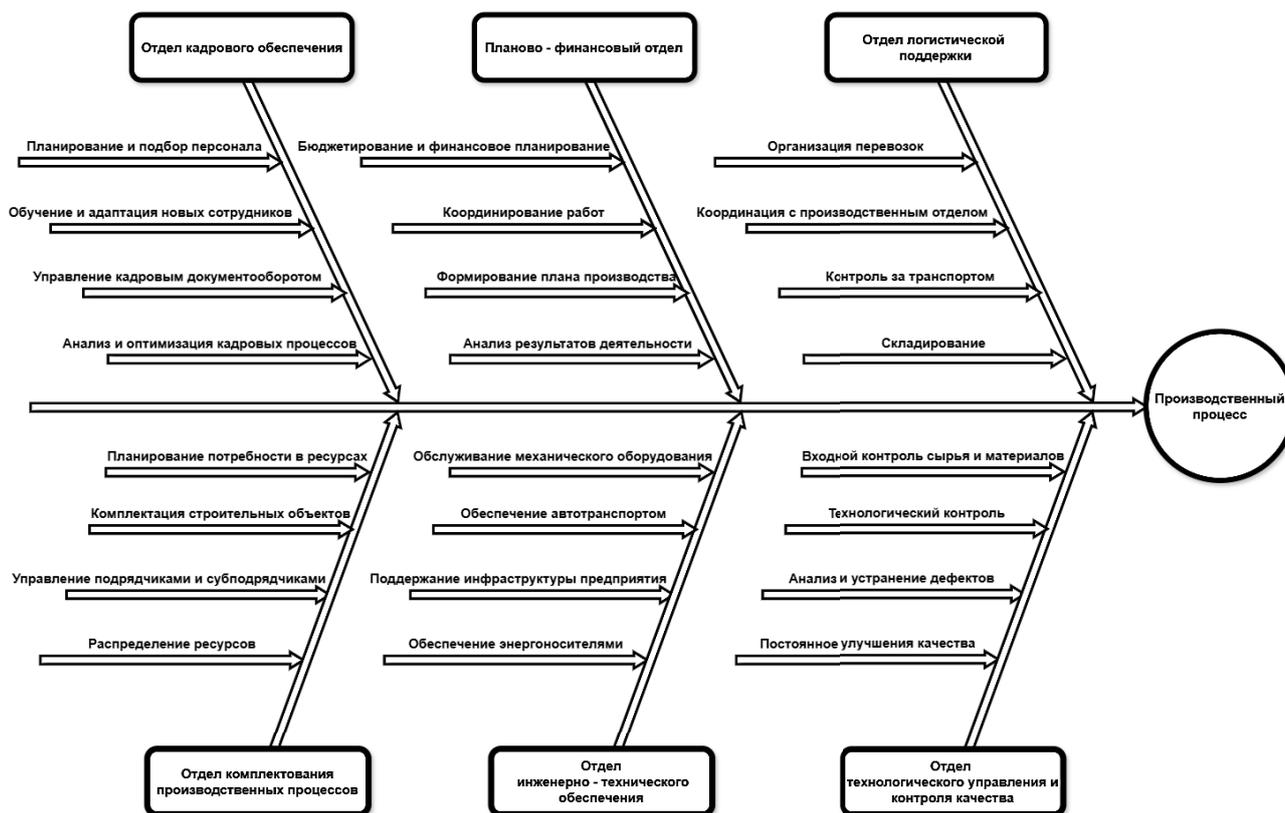


Рис. 3. Структура системы поддержки

Система включает в себя ряд взаимосвязанных элементов, каждый из которых играет уникальную роль в обеспечении слаженной работы всех подразделений и участников строительного процесса. Среди ключевых компонентов можно выделить:

1. Отдел кадрового обеспечения

Персонал — это основной актив любой строительной компании. Кадровый модуль занимается следующими задачами:

- подбор специалистов с соответствующей квалификацией и опытом работы;
- организация обучения и повышения квалификации работников;
- разработка программ мотивации персонала для стимулирования высокой производительности труда;

- поддержание благоприятной рабочей атмосферы и условий труда.

2. Планово-финансовый отдел

Эффективное управление финансовыми потоками является необходимым условием для успешного завершения любого строительного проекта. В рамках этого компонента выполняются следующие задачи:

- составление детальной сметы проекта с учетом всех предстоящих затрат;
- оперативный контроль использования выделенных средств;
- оценка рентабельности инвестиций и расчет срока их окупаемости;
- идентификация потенциальных экономических рисков и разработка стратегии их минимизации.

3. Отдел логистической поддержки

Оптимально организованное снабжение и доставка материалов и оборудования на строительные площадки имеют решающее значение для успешного выполнения проекта. Задача логистики заключается в следующем:

- планирование закупок с учетом текущего этапа проекта;
- оптимизация маршрутов транспортировки и способов доставки;
- управление складскими запасами для предотвращения нехватки или избытка материалов;
- контроль соблюдения сроков поставок и комплектования объектов необходимыми ресурсами.

4. Отдел комплектования производственных процессов

Этот отдел отвечает за своевременное предоставление всех необходимых ресурсов, материалов и комплектующих для бесперебойного функционирования производственных линий. Основные задачи данного подразделения включают:

- планирование потребности;
- закупки и управление поставками;
- управление запасами;
- оптимизация процессов;
- координация работы с различными отделами предприятия.

5. Отдел инженерно-технического обеспечения

Для обеспечения надежности и долговечности возводимых объектов применяются современные технологические решения. Этот компонент включает:

- выбор передовых технологий строительства и инновационных материалов;
- регулярное обновление парка специализированной техники и оборудования;
- применение автоматизированных систем контроля выполнения производственных операций.

6. Отдел технологического управления и контроля качества

Отдел технологического управления и контроля качества является ключевым компонентом системы поддержки на любом предприятии, особенно там, где важно обеспечивать стабильное качество продукции и соответствие производственных процессов установленным стандартам. Основные функции отдела технологического управления и контроля качества:

- разработка и стандартизация технологических процессов;
- контроль качества на всех стадиях производства;
- анализ дефектов и коррекционные мероприятия;
- сертификация и соответствие нормативным требованиям;
- мониторинг и аудит производственных процессов.

Для строительной компании риски в системе организационного обеспечения можно разделить на несколько категорий, учитывая специфику отрасли (табл. 1). Классификация поможет выявить потенциальные угрозы и разработать стратегию их предотвращения или минимизации [1]. Ниже представлена подробная классификация рисков.

Таблица 1

Классификация рисков

1. По источнику возникновения	Внешние риски	- Экономические риски: изменения в экономической ситуации страны или региона (инфляция, рост цен на материалы, снижение покупательской способности населения).
		- Политико-правовые риски: изменения в законодательстве, налоговые реформы, санкции и другие политические факторы.
		- Социальные риски: демографические изменения, миграция рабочей силы, общественные движения против строительства.
	Внутренние риски	- Организационно-управленческие риски: ошибки в планировании, нехватка квалифицированных кадров, проблемы с коммуникациями внутри компании.
		- Технические риски: несоответствие техники нормам безопасности, поломка оборудования, сбой в системах автоматизации.
		- Финансовые риски: недостаточное финансирование проектов, кассовые разрывы, задержка платежей подрядчиками или заказчиками.
		- Кадровые риски: высокая текучесть кадров, низкая мотивация сотрудников, недостаток специалистов узкого профиля.

2. По характеру последствий	Операционные риски	- Задержки в строительстве: нарушение сроков сдачи объектов из-за проблем с поставками, отсутствием рабочих рук или техническими неполадками.
		- Увеличение стоимости проекта: перерасход бюджета из-за непредвиденных обстоятельств (аварии, необходимость модернизации оборудования).
		- Несоответствие качеству: дефекты конструкций, использование некачественных материалов, несоблюдение стандартов строительства
	Стратегические риски	- Неправильный выбор стратегии: некорректная оценка рыночных условий, конкуренция, недооценка потребностей заказчиков.
		- Отсутствие инноваций: замедленное внедрение новых технологий, устаревшие методы работы, отставание от конкурентов.
	Финансовые риски	- Недостаточность финансирования: нехватка оборотных средств, дефицит инвестиций, сложности с привлечением заемных средств.
		- Инфляционные риски: рост цен на строительные материалы и услуги, увеличение себестоимости строительства.
		- Кредитные риски: невозможность погасить кредиты или займы, высокие процентные ставки.
	Правовые риски	- Нарушения законодательства: проблемы с получением разрешений, лицензий, несоответствие проектной документации правовым нормам.
		- Судебные разбирательства: споры с подрядчиками, субподрядчиками, заказчиками, претензии третьих лиц.
	Репутационные риски	- Плохая репутация: негативные отзывы заказчиков, публикации в СМИ, скандалы вокруг объектов компании.

Эффективному управлению рисками способствует сформированная корпоративная культура, охватывающая внедрение передовых методик и практического опыта на каждом уровне предприятия [2]. Подобный подход помогает строительным компаниям минимизировать угрозы и преобразовать отдельные факторы риска в перспективные направления расширения бизнеса. Особое внимание акцентируется на освоении инновационных решений, базирующихся на цифровых технологиях, среди которых выделяется применение аппарата нечеткой логики. Этот метод учитывает присущую строительству высокую степень неопределенности и зависимость от экспертных мнений.

Нечеткая логика представляет собой расширение классической булевой логики, позволяющее оперировать понятиями и переменными, значения которых могут быть частично истинными или ложными. Этот метод был предложен Лотфи Заде в 1960-х годах и получил широкое распространение в различных областях науки и техники. В отличие от традиционной двоичной логики, где утверждения могут принимать лишь два значения («истина» или «ложь»), нечеткая логика допускает градуированные оценки, что делает её особенно полезной для анализа сложных систем с высокой степенью неопределенности.

Методы исследования

При управлении рисками в строительной отрасли использование аппарата нечеткой логики даёт возможность структурировать опыт специалистов и субъективные мнения, учитывать случайный характер происходящих событий и снижать воздействие человеческих ошибок на процесс принятия управленческих решений [3]. Эта методика приобретает особую значимость в ситуациях дефицита достоверных сведений и нестабильных условий внешней среды.

Использование нечеткой логики в управлении рисками обладает рядом преимуществ, которые делают этот подход перспективным для применения в строительной отрасли:

1. Учет неопределенностей: нечеткая логика позволяет обрабатывать данные, характеризующиеся неопределенностью и неполнотой, что часто встречается в реальных проектах [4]. Это особенно актуально для оценки рисков, когда информация о будущих событиях может быть недостаточно точной или полной.

2. Интеграция экспертных знаний: методология нечеткой логики основана на принципах лингвистической обработки информации, что облегчает интеграцию опыта и интуиции экспертов в процесс принятия решений. Это суще-

ственно повышает качество прогнозов и рекомендаций.

3. Адаптивность: нечеткие модели легко адаптируются к изменениям внешней среды и новым данным, что делает их полезными в динамично меняющихся условиях строительного бизнеса.

4. Простота интерпретации: результаты работы нечетких систем представлены в форме, понятной специалистам без глубокого знания математики. Это упрощает взаимодействие между техническими специалистами и руководителями проектов.

Основу системы распознавания рисков строительной организации на основе нечеткой логики составляет база знаний, строящаяся по данным опроса экспертов.

База знаний представляет собой множество нечетких правил $R_k, k = 1, \dots, N$, вида:

$$R^{(k)} \text{ IF } \left(\begin{array}{l} x_1 \text{ это } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ это } A_2^k \\ \dots \text{ AND } x_n \text{ это } A_n^k \end{array} \right), \\ \text{ THEN } \left(\begin{array}{l} y_1 \text{ это } B_1^k \text{ AND } y_2 \text{ это } B_2^k \\ \dots \text{ AND } y_m \text{ это } B_m^k \end{array} \right), \quad (1)$$

где N — количество нечетких правил;

A_i^k — нечеткие множества;

B_j^k — нечеткие множества.

$$A_i^k \subseteq X_i \subset R, i = 1, \dots, n, \\ B_j^k \subseteq Y_j \subset R, i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

x_1, x_2, \dots, x_n — входные переменные производственной модели;

y_1, y_2, \dots, y_m — выходные переменные производственной модели.

Символами $X_i, i = 1, \dots, n$ и $Y_j, j = 1, \dots, m$ обозначаются соответственно пространства входных и выходных переменных.

Поскольку конкретные правила $R^{(k)}, k = 1, \dots, N$ связаны между собой логическим оператором «ИЛИ» и выходы y_1, y_2, \dots, y_m взаимно независимы, то можно использовать нечеткие правила со скалярным выходом в форме

$$R^{(k)} : \text{ IF } \left(\begin{array}{l} x_1 \text{ это } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ это } A_2^k \\ \dots \text{ AND } x_n \text{ это } A_n^k \end{array} \right) \\ \text{ THEN } (y \text{ это } B^k), \quad (3)$$

где $B_i^k \subseteq Y_j \subset R$ и $k = 1, \dots, N$.

Каждое правило вывода состоит из части IF, называемой посылкой, и части THEN, называемой следствием. Посылка правила содержит набор ус-

ловий, тогда как следствие содержит вывод.

Переменные $(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ и y могут приниматься как лингвистические (например, «малый», «средний», «большой»), так и числовые значения. Если ввести обозначения

$$X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n, \\ A^k = A_1^k \times A_2^k \times \dots \times A_n^k, \quad (4)$$

то правило вывода можно представить в виде нечеткой импликации

$$R^{(k)} : A^k \rightarrow B^k, k = 1, \dots, N. \quad (5)$$

При проектировании модулей нечеткого управления следует оценивать достаточность количества нечетких правил, их непротиворечивость и наличие корреляции между отдельными правилами.

Для примера, приведем правила, которые могут входить в базу знаний данной системы:

Правило 1:

ЕСЛИ Задержка поставок материалов является Высокой, ТО Риск нарушения сроков строительства является Высоким.

Правило 2:

ЕСЛИ Недостаточная квалификация рабочих является Средней, И Отсутствие должного контроля качества является Низким, ТО Риск брака в строительстве является Средним.

Правило 3:

ЕСЛИ Неустойчивость финансового положения подрядчика является Высокой, И Частота просрочки платежей является Частой, ТО Риск невыполнения обязательств является Очень Высоким.

Правило 4:

ЕСЛИ Изменение проектной документации происходит Часто, И Соответствие новым нормативам является Низким, ТО Риск несоблюдения стандартов является Высоким.

Правило 5:

ЕСЛИ изменение погодных условий значительное И инфраструктура объекта недостаточно развита, ТО риск увеличения затрат ВЫСОКИЙ.

Эти правила являются лишь примерами и иллюстрируют подход к оценке различных факторов риска через использование лингвистических переменных («высокий», «низкий», «неустойчивый») и логических операторов («если...то») [5]. Такая система позволяет учитывать субъективность мнений экспертов и гибко моделировать риски в условиях неопределенности.

Для наглядного представления преиму-

ществ использования подходов на основе нечёткой логики рассмотрим сравнительный анализ традиционного метода и метода с применением нечётких множеств. Результаты сравнения представлены в табл. 2.

Для объективной демонстрации улучшений после внедрения методов нечёткой логики проведём сопоставление основных метрик управления рисками. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 2

Сравнение традиционного подхода и подхода на основе нечеткой логики для оценки риска задержки поставок материалов

Критерий оценки	Традиционный подход (баллы 1-5)	Подход на основе нечеткой логики (лингвистические переменные)
Вероятность задержки	Средняя (3)	“Небольшая вероятность” (функция принадлежности к множеству “Небольшая”)
Влияние на сроки	Высокое (4)	“Значительное влияние” (функция принадлежности к множеству “Значительное”)
Четкость/Детализация оценки	Низкая (1)	Высокая
Учет неопределенности	Низкий (1)	Высокий

Таблица 3

Сравнение показателей управления рисками (до и после внедрения нечёткой логики)

Показатель	До внедрения нечеткой логики	После внедрения нечеткой логики	Изменение (%)
Количество перерасходов бюджета (%)	8%	4%	-50%
Среднее время задержки проекта (дни)	30	15	-50%
Количество инцидентов/аварий	5	2	-60%

Полученные данные свидетельствуют о существенном улучшении показателей управления рисками после внедрения методики на основе нечёткой логики. Сокращение перерасходов бюджета, уменьшение среднего времени задержки проектов и снижение числа инцидентов указывают на повышение общей эффективности процессов управления риском [6].

Результаты

1. Актуальность проблемы риска в строительстве

- Анализ показывает, что строительные организации сталкиваются с различными видами рисков, такими как технические, экономические, организационные и правовые риски.

- Традиционные методы оценки рисков часто оказываются недостаточными ввиду сложности и неопределённости процессов строительства.

2. Применение аппарата нечёткой логики

- Нечёткая логика позволяет учитывать субъективность оценок экспертов и высокую степень неопределенности, характерную для строительной отрасли.

- Использование теории нечётких множеств помогает формализовать процесс принятия решений относительно выбора оптимального варианта реализации проекта с учётом множества факторов риска.

3. Методология исследования

- Предложены алгоритмы построения моделей нечёткого анализа рисков, включающие оценку степени принадлежности объектов различным категориям риска.

- Разработаны механизмы расчёта интегральных показателей уровня риска проектов, учитывающие комплексные характеристики проектируемых объектов.

4. Практическая значимость результатов

- Реализация предложенных подходов по-

зволит повысить эффективность системы управления рисками в строительных компаниях [7].

- Это способствует снижению финансовых потерь, повышению качества принимаемых управленческих решений и улучшению конкурентоспособности организаций.

Заключение

Таким образом, предложенная методика обеспечивает инструментальную основу для принятия обоснованных решений в ситуациях, характеризующихся высокой степенью неопределённости и сложности.

Исследование показало, что применение методов нечёткой логики существенно улучшает качество оценки рисков в строительстве, позволяя строить более адекватные модели и повышать надёжность принимаемых решений. Полученные результаты имеют перспективу дальнейшего развития и внедрения в практическую деятельность строительных компаний.

Поступила 26.04.2025; принята к публикации 09.06.2025

Информация об авторах

Антипов Сергей Сергеевич – аспирант кафедры электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sergo_vzp@mail.ru

Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvl@vorstu.ru

PROBLEMS OF RISK MANAGEMENT WITHIN THE FRAMEWORK OF ORGANIZATIONAL SYSTEMS OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY BASED ON THE APPARATUS OF FUZZY LOGIC

S.S. Antipov, V.L. Burkovskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article considers the problems of risk management within the organizational systems of construction companies using the apparatus of fuzzy logic. In the conditions of uncertainties typical for the construction business, there is a need to develop effective tools for risk analysis and forecasting. Fuzzy logic tools allow taking into account the subjectivity of assessments and the complexity of the interaction of various risk factors, providing a more flexible approach to management. We consider the procedure for identifying the main types of risks typical for construction organizations, as well as issues of their qualitative assessment taking into account expert opinions and real data generated within the framework of similar projects. To formalize the management process, we used membership functions that allow converting qualitative characteristics of risks into numerical values. In addition, we considered the process of developing models that allow predicting possible scenarios for the development of events taking into account the impact of identified risks. These models are based on the rules of fuzzy inference, which takes into account the multiplicity of possible outcomes and the degree of confidence in each of them. At the same time, the development of a risk response strategy, including measures to prevent negative consequences and minimize damage plays an important role

Key words: fuzzy logic, risks, decision making processes, data monitoring, risk management

Литература

1. Авдийский В.И., Безденежных В.М. Теория и практика управления рисками организации: учебник. М.: КноРус, 2020. 275 с.
2. Гордеев П.Н. Методы анализа и минимизации рисков в организационных системах строительной отрасли. Новосибирск: Наука, 2017. 312 с.
3. Семенов Б.П. Методологические аспекты построения моделей риска в организационно-экономических структурах строительства на основе принципов нечёткости. Ростов-на-Дону: Феникс, 2019. 232 с.
4. Григорьева Д.Р., Гареева Г.А., Басыров Р.Р. Основы нечеткой логики. Набережные Челны: Изд-во НЧИ КФУ, 2018. 42 с.
5. Шароватов А.Е. Проблематика оценки экономических рисков предприятий стройиндустрии средствами формального аппарата нечёткой логики. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2017. 216 с.
6. Капустин В.В., Николаев Ф.Р. Подходы к управлению риском в строительной отрасли с привлечением методик нечёткой математики // Управление проектами и программами. 2024. № 3. С. 112–123.
7. Акимова О.Н., Уколов К.В. Модели оценки рисков строительных проектов с использованием нечёткого анализа: монография. М.: ИНФРА-М, 2022. 216 с.

References

1. Avdiyskiy V.I., Bezdeneshnykh V.M. “Theory and practice of organizational risk management” (“Teoriya i praktika upravleniya riskami organizatsii”), textbook, Moscow: KnoRus, 2020, 275 p.
2. Gordeev P.N. “Methods of risk analysis and minimization in organizational systems of the construction industry” (“Metody analiza i minimizatsii riskov v organizatsionnykh sistemakh stroitel'noy otrasli”), Novosibirsk: Nauka, 2017, 312 p.
3. Semenov B.P. “Methodological aspects of constructing risk models in organizational and economic structures of construction based on the principles of fuzziness” (“Metodologicheskie aspekty postroyeniya modeley riska v organizatsionno-ekonomicheskikh strukturakh stroitel'stva na osnove printsipov nechetkosti”), Rostov-on-Don: Feniks, 2019, 232 p.
4. Grigorieva D.R., Gareeva G.A., Basyrov R.R. “Fundamentals of fuzzy logic” (“Osnovy nechetkoy logiki”), Naberezhnye Chelny: Publishing House of the National Chita Institute of Kazan Federal University, 2018, 42 p.
5. Sharovатов A.E. “Problems of assessing economic risks of construction industry enterprises using the formal apparatus of fuzzy logic” (“Problematika otsenki ekonomicheskikh riskov predpriyatiy stroyindustrii sredstvami formal'nogo apparata nechetkoy logiki”), Khabarovsk: Pacific National University, 2017, 216 p.
6. Kapustin V.V., Nikolaev F.R. “Approaches to risk management in the construction industry using fuzzy mathematics methods”, *Project and Program Management (Upravleniye proyektami i programmami)*, 2024, no. 3, pp. 112–123.
7. Akimova O.N., Ukolov K.V. “Risk assessment models for construction projects using fuzzy analysis” (“Modeli otsenki riskov stroitel'nykh proyektov s ispol'zovaniem nechetkogo analiza”), monograph, Moscow: INFRA-M, 2022, 216 p.

Submitted 26.04.2025; revised 09.06.2025

Information about the authors

Sergey S. Antipov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sergo_vzp@mail.ru

Viktor L. Burkovskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Academician of the Russian Academy of Economic Sciences, Academician of the Russian Academy of Computer Sciences, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЗНАЧЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ФАКТОРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.В. Чирков

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»,
г. Москва, Россия

Аннотация: представлен алгоритм предварительной обработки данных для диагностики технического состояния электротехнического оборудования на примере распределительного щита, используемого на сборочных линиях электронной промышленности. Рассматриваются параметры качества электроэнергии, включая напряжение, ток и коэффициент мощности, а также особенности промышленных измерений (шумы, выбросы, пропуски). Алгоритм включает фильтрацию выбросов на основе межквартильного размаха, медианную импутацию пропусков, минимакс-нормализацию и учёт временных окон отклонений относительно нормативов ГОСТ 32144-2013. Подготовленные таким образом данные используются в ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) для диагностики и классификации состояний. Подход позволяет уменьшить количество ложных срабатываний и повысить устойчивость к кратковременным аномалиям, упрощая разметку для экспертов. Тестирование на реальных временных рядах показало улучшение метрик по сравнению с пороговым методом: более точная идентификация предкритических и критических состояний и повышение итоговой точности классификации на обработанных данных. Предложенное решение применимо к сложным трёхфазным системам с взаимозависимыми параметрами и может быть масштабировано на другие системы и отрасли

Ключевые слова: диагностика технического состояния оборудования, нейронные сети, ANFIS, предварительная обработка данных, анализ данных, нечеткие системы, микроэлектроника, силовые трансформаторы, источники питания

Введение

Диагностика электротехнического оборудования играет ключевую роль в обеспечении стабильной и безопасной работы промышленных предприятий, особенно в таких критически важных отраслях, как микроэлектроника [1,2]. Отклонения показателей качества электроэнергии (ПКЭ), таких как напряжение, частота и коэффициент гармоник, приводят к нежелательным последствиям, начиная от снижения эффективности работы оборудования и заканчивая его полным выходом из строя. Эти отклонения вызваны различными факторами, включая перегрузки, сбои в сети или неисправности самого оборудования.

В связи с этим становится важной задача разработки эффективных алгоритмов для автоматизированной диагностики и прогнозирования неисправностей оборудования на основе анализа данных, поступающих с датчиков ПКЭ [3]. Современные методы, такие как адаптивные нечеткие нейронные системы (ANFIS), предлагают мощные инструменты для анализа данных и принятия решений, позволяя учитывать сложные взаимосвязи между параметрами

[4]. Однако для корректного функционирования таких систем необходима качественная предварительная обработка данных, которая включает фильтрацию выбросов, нормализацию и анализ временных интервалов отклонений.

В данной работе представлен алгоритм, который позволяет предварительно обрабатывать данные о ПКЭ с промышленного оборудования и использовать их для дальнейшего анализа с помощью ANFIS. Основное внимание уделено фильтрации выбросов, нормализации данных и выявлению отклонений с учетом временных характеристик. Применение предложенного подхода улучшит диагностику состояния оборудования и повысит его надежность, поэтому данная работа является актуальной и своевременной.

Материалы и методы

Электротехническое оборудование на промышленных предприятиях, особенно в микроэлектронной промышленности, сталкивается с рядом проблем, связанных с обработкой данных. Показатели качества электроэнергии (ПКЭ) включают такие параметры, как напряжение, частота и коэффициенты гармоник и

требуют постоянного мониторинга для обеспечения корректной работы оборудования. Однако данные, поступающие с датчиков, часто содержат шумы, выбросы и пропуски, что усложняет процесс диагностики и анализа.

Сенсоры на промышленных объектах фиксируют временные сбои, краткосрочные отклонения и аномальные значения, которые, в зависимости от контекста, либо представляют собой полезную информацию для диагностики, либо считаются шумом. Проблема заключается в том, что необходимо разработать методы, позволяющие отделять незначительные отклонения от значимых для оборудования событий.

Существуют несколько методов для очистки и нормализации данных, которые применяются в различных отраслях для решения данных задач [5]:

- Межквартильный размах (IQR). Метод межквартильного размаха используется для выявления выбросов на основе статистической модели данных. Выбросы определяются как значения, которые выходят за пределы установленного диапазона. Исследование [6] показало, что этот метод является одним из наиболее эффективных для данных с асимметричными распределениями, что характерно для промышленных данных о ПКЭ.

- Z-оценка. Статистический метод, позволяющий оценить степень отклонения значений от среднего. Данный подход особенно полезен для данных с нормальным распределением, однако менее эффективен для данных, где наблюдается значительная асимметрия.

- Фильтр Калмана. Метод применяется для сглаживания временных рядов и удаления шума из данных. В работе [7] показано, что фильтр Калмана способен эффективно работать с данными в реальном времени, однако он скрывает критические отклонения, что снижает его применимость для диагностики, где важны кратковременные аномалии.

- Методы машинного обучения. Обнаружение аномалий с использованием нейронных сетей и методов глубокого обучения становится все более популярным в промышленности. Эти подходы позволяют анализировать большие массивы данных и выявлять сложные аномальные паттерны, однако они требуют больших вычислительных ресурсов и сложны в настройке [8].

Для решения задач, связанных с предварительной обработкой данных о показателях качества электроэнергии, выбраны методы, которые обеспечивают высокую эффективность при

работе с несимметричными и неоднородными данными, характерными для промышленных объектов. Включение каждого метода основано на его способности решать конкретные проблемы данных.

1. Межквартильный размах (IQR). Для фильтрации выбросов выбран метод IQR, поскольку он демонстрирует высокую устойчивость к аномалиям в данных с асимметричным распределением, что часто наблюдается в промышленных данных. Исследование [9] показало, что IQR превосходит Z-оценку при анализе данных с выбросами, возникающими из-за кратковременных сбоев.

2. Замена пропущенных значений медианой. Пропуски данных, вызванные сбоями сенсоров, обрабатываются путем их замены медианными значениями. Такой подход позволяет сохранить общую структуру данных без значительных изменений. Метод медианной замены устойчив к выбросам и лучше подходит для данных с нерегулярными пропусками.

3. Нормализация методом минимакс. Приведение параметров, таких как напряжение и частота, к единому диапазону с использованием минимакс нормализации позволяет корректно обрабатывать данные в рамках дальнейшего анализа. Этот метод широко применяется в энергетике, и его эффективность продемонстрирована в работе [10], где нормализация позволила улучшить точность прогнозов неисправностей.

4. Анализ временных интервалов отклонений. Дополнительно применяется анализ времени, в течение которого показатели качества электроэнергии находятся за пределами допустимых значений. Исследование [11] показало, что длительность отклонений является важным фактором в диагностике предаварийных состояний, что делает этот метод важным компонентом для анализа данных в рамках данного исследования.

Каждый из представленных методов выбран с учетом особенностей данных, получаемых с электротехнического оборудования. Их совместное использование позволяет улучшить качество данных перед их дальнейшей обработкой в системе ANFIS, что обеспечивает более точное прогнозирование состояний оборудования.

Результаты

Алгоритм предварительной обработки данных разработан с целью подготовки показа-

телей качества электроэнергии (ПКЭ) для дальнейшего анализа с использованием адаптивной нечеткой системы ANFIS. Предлагаемый подход обеспечивает надежную фильтрацию выбросов, замену пропущенных данных и нормализацию параметров, что повышает точность диагностики состояния оборудования. Алгоритм разделяется на следующие ключевые этапы:

1. Предварительная обработка данных. Для получения данных, как правило, используются сенсоры, фиксирующие ключевые параметры состояния оборудования, такие как температура, вибрация, напряжение и ток. Данные поступали в виде временных рядов [12], которые можно описать как

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}, \quad (1)$$

где t — момент времени, а $x_n(t)$ — значения параметров оборудования на момент времени t .

2. Очистка данных. Для удаления выбросов и аномальных значений был применен метод межквартильного размаха (IQR), который позволяет выявлять и устранять аномалии, вызванные сбоями сенсоров или внешними помехами.

Выбросы были определены как значения, выходящие за пределы следующего диапазона:

$$IQR = Q_3 - Q_1, \quad (2)$$

где Q_1 — это первый квартиль, а Q_3 — третий квартиль. Все данные, выходящие за пределы интервала

$$[Q_1 - 1.5 \times IQR, Q_3 + 1.5 \times IQR], \quad (3)$$

которые были классифицированы как выбросы и либо скорректированы, либо удалены из набора данных. Этот процесс позволил минимизировать влияние аномальных значений на дальнейший анализ и улучшить качество данных для диагностики.

3. Нормализация данных. Нормализация данных была выполнена для приведения всех параметров к единой шкале, что необходимо для корректного анализа многомерных данных, где параметры измеряются в различных единицах. Метод минимакс нормализации использовался для преобразования значений параметров по следующей формуле:

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (4)$$

где X_{\min} и X_{\max} — это минимальные и максимальные значения параметра X в наборе данных. Это приведение данных к диапазону $[0,1]$ улучшает дальнейший анализ и делает модель машинного обучения более устойчивой к масштабным различиям параметров.

4. Анализ временных интервалов отклонений. Для анализа отклонений данных от нормативных значений, установленных по ГОСТ 32144-2013 [13], проведено исследование времени, в течение которого параметры выходили за допустимые пределы. Это помогает с определением не только факта отклонения, но и его продолжительности. Суммарное время отклонений рассчитывалось по формуле

$$T_{\text{откл}} = \sum_{i=1}^n Dt_i, \quad (5)$$

где Δt_i — интервал времени, на котором параметры оборудования находились за пределами допустимых значений. Эти интервалы фиксируются для последующего анализа в системе диагностики.

Алгоритм протестирован на данных, полученных с электротехнического оборудования в трехфазной электрической системе, используемого на сборочной линии в промышленности электроники. Данные включали информацию о показателях качества электроэнергии (напряжение, частота, коэффициент гармоник, фазовые углы и коэффициент мощности), которые являются критичными для стабильной работы автоматизированных систем сборки. Эти параметры играют важную роль в обеспечении надежности и точности работы оборудования, поскольку любые отклонения в электрической системе потенциально влияют на производительность и качество сборки компонентов.

Мониторинг проводился на уровне как общего распределительного щита, так и с помощью локальных измерительных устройств, установленных на ключевых элементах сборочной линии для детального анализа электроэнергии, потребляемой различными машинами, такими как автоматы для пайки и установки электронных компонентов. Это позволяло получать данные о состоянии системы в течение эмуляции нескольких дней работы оборудования.

Данные для тестирования были взяты из открытых источников Kaggle [14], что дало возможность эмулировать условия работы реальной производственной линии в течение месяца, позволяя алгоритму оценивать стабиль-

ность и качество электроэнергии, необходимой для бесперебойной работы высокоточных процессов.

В предоставленном наборе данных (табл. 1) содержатся измерения, снятые с оборудования для оценки качества электроэнергии. Временные ряды охватывают значения напряжения, тока, фазовых углов и мощности. Вот подробное описание столбцов, которые содержатся в наборе данных:

1. $V_{rmsph-nANAvg}$, $V_{rmsph-nBNAvg}$, $V_{rmsph-nCNAvg}$ — среднеквадратическое напряжение для фаз А, В и С относительно нейтрали (фаза-нейтраль). Согласно ГОСТ 32144-2013, допустимое отклонение напряжения составляет $\pm 10\%$ от номинального напряжения.

2. $V_{rmsph-nNGAvg}$ — напряжение между нейтралью и землей. В стандартах ГОСТ конкретных нормативов для этого параметра нет, но отклонения от близких к нулю значений потенциально указывают на проблемы в системе заземления.

3. $CurrentAAvg$, $CurrentBAvg$, $CurrentCAvg$ — средние значения тока для фаз А, В и С. ГОСТ не дает конкретных пределов для тока, так как они зависят от типа оборудования и нагрузки. Отклонения тока используются для оценки асимметрии нагрузки.

4. $CurrentPhiANAvg$, $CurrentPhiBNAvg$, $CurrentPhiCNAvg$ — углы фазового сдвига между током и напряжением для фаз А, В и С. Сильные отклонения вероятно свидетельствуют о низком коэффициенте мощности, что указывает на неэффективное использование энергии.

5. $ActivePowerTotalAvg$ — активная мощность, которая фактически используется оборудованием. В ГОСТ 32144-2013 активная мощность не имеет строгих нормативов, но ее анализ важен для общей оценки производительности.

6. $ApparentPowerTotalAvg$ — полная мощность, которая учитывает как активную, так и реактивную компоненты. Полная мощность полезна для оценки общей загруженности системы.

7. $ReactivePowerTotalAvg$ — реактивная мощность, которая не выполняет полезной работы, но нагружает сеть. Высокие значения реактивной мощности указывают на неэффективное использование системы, а также на необходимость коррекции коэффициента мощности.

8. $CosPhiANAvg$, $CosPhiBNAvg$, $CosPhiCNAvg$, $CosPhiTotalAvg$ — коэффициенты мощности для фаз А, В, С и общий. Соглас-

но ГОСТ 32144-2013, данные показатели в норме выше 0.9. Низкие значения указывают на неэффективность системы и необходимость коррекции.

В ходе предварительной обработки данных, как упоминалось ранее, использовалось нормативное руководство ГОСТ 32144-2013 [13] для установления пороговых значений основных параметров, таких как напряжение и коэффициент мощности. Для каждого параметра были выделены три состояния: нормальное, предкритическое и критическое. Эти состояния были заданы на основе отклонений от норм ГОСТ: нормальные значения параметров соответствовали диапазонам, указанным в стандарте, в то время как предкритические и критические состояния были определены на основе отклонений от этих норм. Данные были классифицированы в три группы, что позволило задать начальные правила для последующего обучения модели ANFIS. Ниже приведены некоторые из таких правил:

- Если $198 \leq V_{rms} \leq 242$ и $\cos \varphi \geq 0.9$, то "состояние нормальное"
- Если $190 \leq V_{rms} < 198$ или $242 < V_{rms} \leq 250$ и $0.85 \leq \cos \varphi < 0.9$, то "состояние предкритическое"
- Если $V_{rms} < 190$ или $V_{rms} > 250$ и $\cos \varphi < 0.85$, то "состояние критическое".

Для корректного сравнения бинарной классификации ГОСТ и трех состояний ANFIS критические и предкритические состояния ANFIS были объединены в одну группу, соответствующую поломке. Это позволило сравнить точность обнаружения поломок для обоих методов. Кластеризация данных также использовалась для верификации подхода (в особенности порогового метода по ГОСТ), проверяя, насколько точно каждый из методов фиксирует аномалии и критические состояния.

Таблица 1

Фрагмент массива данных с датчиков сборочной линии

Date	Time	Vrmsph-n AN Avg	Vrmsph-n BN Avg	Vrmsph-n CN Avg	Current A Avg	Current B Avg	Current C Avg	...	Cos Phi BN Avg	Cos Phi CN Avg	Cos Phi Total Avg
8/31/2019	3:21:43 PM.135	242.58	241.98	242.12	596	544.7	496.3	...	0.96	0.99	0.98
8/31/2019	3:22:13 PM.135	242.98	242.34	242.72	612.5	541.1	494.8	...	0.98	1	1
8/31/2019	3:22:43 PM.135	243.04	242.18	242.78	628.3	558.3	508.8	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:23:13 PM.135	242.92	242.06	242.7	640.2	562.5	510.5	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:23:43 PM.135	242.52	241.62	242.2	652.7	587.6	533.5	...	0.98	1	1
8/31/2019	3:24:13 PM.135	242.58	241.62	242.22	656.8	595	546.1	...	0.98	1	1
8/31/2019	3:24:43 PM.135	242.4	241.38	242.08	659.5	588.8	542.2	...	0.98	1	1
8/31/2019	3:25:13 PM.135	242.28	241.18	241.98	652.2	575.6	532.5	...	0.98	1	1
8/31/2019	3:25:43 PM.135	242.54	241.28	242.18	648.3	574.9	531.1	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:26:13 PM.135	242.56	241.64	242.22	663.5	586.5	543	...	0.98	1	1
8/31/2019	3:26:43 PM.135	242.26	241.42	241.92	659.5	586.7	540.7	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:27:13 PM.135	242.36	241.48	242	648.9	582.9	536.1	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:27:43 PM.135	242.58	241.78	242.28	648.2	582.8	536.3	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:28:13 PM.135	242.6	241.66	242.22	651.5	584.8	539	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:28:43 PM.135	242.46	241.36	242	643	578.6	534.1	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:29:13 PM.135	242.52	241.62	242.12	660.7	599.7	555.7	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:29:43 PM.135	241.3	240.4	240.94	801	748.8	701.2	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:30:13 PM.135	241.38	240.44	241.08	799.4	748.9	702.3	...	0.99	1	1
8/31/2019	3:30:43 PM.135	241.14	240.2	240.8	797.9	748.2	702	...	0.99	1	1

Обсуждение и перспективы применения

Пороговый метод оценки параметров, в частности по нормативные требования ГОСТ, обеспечивает строгий контроль параметров системы на основе нормативов, фиксируя отклонения от установленных порогов. Несмотря на то, что потенциально количество пороговых правил неограниченно и на практике большинство электротехнического оборудования имеет

собственные уникальные пороговые значения отклонений, такой подход может приводить к большому числу ложных срабатываний из-за своей жесткости, а также не учитывает кратковременные отклонения или сложные зависимости между параметрами. В результате точность метода (41.38%) в реальных условиях ограничена, и его применение в более сложных условиях диагностики недостаточно эффективная.

Таблица 2

Сравнение метрик

Метод	Количество ложных срабатываний	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)	Точность диагностики (%)
Пороговый метод по ГОСТ	78	—	—	—	41.38
ANFIS на необработанных данных	121	51.60	72.07	60.14	51.60
ANFIS на обработанных данных	26	88.74	87.71	83.51	88.74

ANFIS на необработанных данных способен выявлять сложные зависимости с точностью до 51.60 % между параметрами, превосходя пороговый метод за счет использования нечетких правил и их усовершенствования в процессе обучения, однако он также подвержен большому числу ложных срабатываний из-за наличия шумов и выбросов. Это снижает его эффективность без предварительной обработки данных. В качестве простого базового ориентира можно использовать наивный байесовский классификатор, адаптированный под большие данные [15].

ANFIS на обработанных данных демонстрирует потенциально наилучшие результаты (88.74 %), поскольку после предварительной фильтрации и нормализации данных модель минимизирует ложные срабатывания и точно классифицирует состояния системы, включая предкритические и критические. Такой подход становится особенно полезным при наличии экспертов, которые сформулируют точные начальные нечеткие правила для диагностики систем со сложными взаимосвязями, таких как промышленное оборудование в микроэлектронике, где важно выявление предвестников сбоев на ранних стадиях.

Без участия специалистов сравнение порогового метода и ANFIS остается частичным. Тем не менее, параметры по ГОСТу или иные пороговые нормативные ограничения и их временные окна отлично подходят для упрощения процесса разметки данных. Первичная очистка данных и выделение аномалий позволят сократить объем работы для специалистов, занимающихся ручной разметкой, и улучшить дальнейшее обучение моделей.

Заключение

Таким образом, ANFIS на обработанных данных демонстрирует значительные преимущества по сравнению с пороговым методом по ГОСТ благодаря своей гибкости и способности выявлять сложные зависимости между параметрами. Это особенно актуально для сложных систем, таких как оборудование для микроэлектроники, где высока вероятность взаимосвязей между множеством параметров, что делает диагностику более сложной задачей.

Сделано:

- Разработан алгоритм предварительной обработки данных для диагностики технического состояния оборудования на примере распределительного щита.

- Проанализированы параметры: напряжение, коэффициент мощности и ток.
- Описано применение метода ANFIS для диагностики и классификации данных.
- Проведено тестирование разработанного алгоритма на реальных данных.
- Реализована предварительная фильтрация и разметка с использованием временных окон.

Доказано:

- Метод ANFIS демонстрирует более высокую точность по сравнению с пороговым методом по ГОСТ.
- Использование временных окон и фильтрации данных упрощает процесс разметки для экспертов.
- Предложенный подход применим к сложным системам с взаимосвязанными параметрами, таким как оборудование в микроэлектронной промышленности.
- Комбинированное использование предварительной обработки и интеллектуального анализа данных повышает надежность и эффективность диагностики.
- Алгоритм способствует снижению количества ложных срабатываний и повышению точности классификации состояний оборудования.

Использование пороговых значений и временных окон для предварительной обработки данных имеет потенциал для значительного упрощения разметки данных. Эти инструменты служат эффективными методами фильтрации явных отклонений, сокращая объем данных, требующих ручной проверки, и облегчая задачу специалистов, занимающихся диагностикой и разметкой. Такой комбинированный подход — предварительная обработка данных с последующим применением продвинутых моделей, таких как ANFIS — может повысить точность и надежность диагностики сложных систем, применимых не только в микроэлектронной промышленности, так и в любых других отраслях.

Литература

1. Саушев А.В., Шерстнев Д.А., Широков Н.В. Анализ методов диагностики аппаратов высокого напряжения // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1073-1085.
2. Гагарина Л.Г., Рубцов Ю.В. Особенности разработки метода классификации плоских QFN-корпусов для применения в составе автоматизированных систем технической подготовки производства изделий микроэлектроники // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2022. Т. 27. № 3. С. 322-332.

3. Power electronics technology for large-scale renewable energy generation / F. Blaabjerg [et al.] // Proceedings of the IEEE. 2023, Vol. 111, No. 4. pp. 335-355.
4. Dai X., Gao Z. From model, signal to knowledge: a data-driven perspective of fault detection and diagnosis // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013. Vol. 9, No. 4. pp. 2226-2238.
5. Karaboga D., Kaya E. Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey // Artificial Intelligence Review. 2019. Vol. 52. pp. 2263-2293.
6. Kalaste A., Sardar M.U., Kudelina K. Modern diagnostic methods of electrical machines: trends and prospects // Energies. 2023. Vol. 16, No. 7. pp. 6345.
7. Rassolkin A., Kalaste A., Demidova G. Trends and challenges in intelligent condition monitoring of electrical machines using machine learning // Applied Sciences. 2021, Vol. 11, No. 6. pp. 2761.
8. Cheng F., He Q.P., Zhao J. A novel process monitoring approach based on variational recurrent autoencoder // Computers and Chemical Engineering. 2019. Vol. 129. pp. 1-14.
9. Camarena-Martinez D., Osornio-Rios R., Romero-Troncoso R.J. Fused empirical mode decomposition and MUSIC algorithms for detecting multiple combined faults in induction motors // Journal of Applied Research and Technology. 2016. Vol. 13, No. 2. pp. 160-167.
10. Confusion-matrix-based kernel logistic regression for imbalanced data classification / M. Ohsaki [et. al] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2017. Vol. 29. pp. 1806-1819.
11. El Bouchikhi E.H., Choqueuse V., Benbouzid M. Induction machine faults detection using stator current parametric spectral estimation // Mechanical Systems and Signal Processing. 2014. Vol. 52. pp. 447-464.
12. Чирков А.В. Алгоритм формирования обучающих и тестовых выборок для анализа характера данных. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024;12(4). [Электронный ресурс]. URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1663> (дата обращения: 21.04.2025).
13. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
14. A Techno Hazard. Electrical Power Quality Meter Dataset [Dataset] / A Techno Hazard. 2020. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/atechnohazard/electrical-power-quality-meter-dataset> (дата обращения: 01.11.2024).
15. Scalable sentiment classification for Big Data analysis using Naïve Bayes Classifier / D. Liu [et al.] // Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Big Data. Santa Clara, CA, USA, 6-9 October 2013, pp. 99-104.

Поступила 10.06.2025; принята к публикации 28.08.2025

Информация об авторах

Чирков Андрей Владимирович – аспирант, специалист по учебно-методической работе каф. института системной и программной инженерии и информационных технологий (СПИИТех), Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоградский административный округ, пл. Шокина, д. 1); тел: +7 (916) 459-75-81; e-mail: andrewchirckov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7982-1722

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR THE PRELIMINARY PROCESSING OF DIAGNOSTIC PARAMETER AND FACTOR VALUES FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRONIC INDUSTRY EQUIPMENT

A.V. Chirkov

National Research University «Moscow Institute of Electronic Technology», Moscow, Russia

Abstract: the article presents a data preliminary processing algorithm for the diagnosis of the technical condition of electrical equipment using the sample shield used on the assembly lines of the electronic industry. We considered the parameters of the quality of electricity, including the voltage, current and power factor, as well as the features of industrial measurements (noise, emissions, omissions). The algorithm includes filtering emissions based on inter-apartment scope, median imputation of passes, minimax-non-commercialization and taking into account temporary windows of deviations regarding the standards of GOST 32144-2013. The data prepared in this way are used in Anfis (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) for diagnosing and classifying conditions. The approach allows one to reduce the number of false works and increase resistance to short-term abnormalities, simplifying the markings for experts. Testing on the real time series showed an improvement in metrics in comparison with the threshold method: more accurate identification of pre-critical and critical conditions and increasing the total accuracy of the classification on processed data. The proposed solution is applicable to complex three-phase systems with interdependent parameters and can be scale to other systems and industries

Key words: diagnosis of the technical condition of equipment, neural networks, ANFIS, data preliminary processing, data analysis, fuzzy systems, microelectronics, power transformers, power sources

References

1. Saushev A.V., Sherstnev D.A., Shirokov N.V. “Analysis of methods for diagnosing high-voltage apparatus”, *Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova)*, 2017, vol. 9, no. 5, pp. 1073–1085.

2. Gagarina L.G., Rubtsov Yu.V. “Features of developing a method for classifying flat QFN packages for use in automated systems for technical preparation of microelectronics production”, *News of Higher Educational Institutions. Electronics (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika)*, 2022, vol. 27, no. 3, pp. 322–332.
3. Blaabjerg F. et al. “Power electronics technology for large-scale renewable energy generation”, *Proceedings of the IEEE*, 2023, vol. 111, no. 4, pp. 335–355.
4. Dai X., Gao Z. “From model, signal to knowledge: a data-driven perspective of fault detection and diagnosis”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 2226–2238.
5. Karaboga D., Kaya E. “Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey”, *Artificial Intelligence Review*, 2019, vol. 52, pp. 2263–2293.
6. Kalaste A., Sardar M.U., Kudelina K. “Modern diagnostic methods of electrical machines: trends and prospects”, *Energies*, 2023, vol. 16, no. 7, pp. 6345.
7. Rassolkin A., Kalaste A., Demidova G. “Trends and challenges in intelligent condition monitoring of electrical machines using machine learning”, *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 6, pp. 2761.
8. Cheng F., He Q.P., Zhao J. “A novel process monitoring approach based on variational recurrent autoencoder”, *Computers and Chemical Engineering*, 2019, vol. 129, pp. 1–14.
9. Camarena-Martinez D., Osornio-Rios R., Romero-Troncoso R.J. “Fused empirical mode decomposition and MUSIC algorithms for detecting multiple combined faults in induction motors”, *Journal of Applied Research and Technology*, 2016, vol. 13, no. 2, pp. 160–167.
10. Ohsaki M., Wang P., Matsuda K., Katagiri S., Watanabe H., Ralescu A. “Confusion-matrix-based kernel logistic regression for imbalanced data classification”, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2017, vol. 29, pp. 1806–1819.
11. El Bouchikhi E.H., Choqueuse V., Benbouzid M. “Induction machine faults detection using stator current parametric spectral estimation”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, vol. 52, pp. 447–464.
12. Chirkov A.V. “Algorithm for forming training and test samples for analyzing data patterns”, *Modeling, Optimization and Information Technology (Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2024, vol. 12, no. 4, available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1663> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.014. (date of access: 21.04.2024)
13. GOST 32144–2013 “Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Quality standards for electrical energy in general-purpose systems”, Moscow: Standartinform, 2014.
14. “A Techno Hazard. Electrical Power Quality Meter Dataset [Dataset]”, A Techno Hazard, 2020, available at: <https://www.kaggle.com/datasets/atechnohazard/electrical-power-quality-meter-dataset> (date of access: 01.11.2024).
15. Liu B., Blasch E., Chen Y., Shen D., Chen G. “Scalable sentiment classification for Big Data analysis using Naïve Bayes Classifier”, *Proc.s of the 2013 IEEE Int. Conf. on Big Data*, Santa Clara, CA, USA, 6–9 October 2013, pp. 99–104.

Submitted 10.06.2025; revised 28.08.2025

Information about the author

Andrey V. Chirkov, graduate student, specialist in educational and methodical work, department of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies (SPINTech), National Research University «Moscow Institute of Electronic Technology» (1 Shokina Square, Zelenograd 124498, Moscow, Russia), tel.: +7 916 459 75 81, e-mail: andrewchirkov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7982-1722

Радиотехника и связь

DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.3.011

УДК 621.391

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА СИГНАЛОВ, НАБЛЮДАЕМЫХ НА ИНТЕРВАЛЕ СБОРА ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ЗАНЯТОСТИ РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА

В.Ю. Полев^{1,2}, В.А. Козьмин³, А.Б. Токарев^{1,3}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия

³АО «ИРКОС», г. Воронеж, Россия

Аннотация: одной из важных задач, решаемых службами радиоконтроля, является измерение занятости радиоканалов и полос частот. Документы Международного союза электросвязи (МСЭ-R), регламентирующие вопросы измерения занятости, при анализе точности и надёжности измерений базируются на констатации требований к числу проверок состояния радиоканалов на интервале измерений. Однако анализ показывает, что в первую очередь надёжность оценивания занятости зависит от количества сигналов в канале, выходящих в эфир на интервале сбора данных. В научной литературе при анализе этого показателя, носящего случайный характер, чаще всего предполагается, что количество сигналов подчиняется закону распределения Пуассона. Однако более детальный анализ показывает, что даже при фиксированной статистической модели формирования потока сигналов реальный закон распределения количества сигналов на интервале измерений может изменяться, отклоняясь от пуассоновского. Исследуются зависимости показателей распределения наблюдаемого количества сигналов от длительности интервала сбора данных и занятости радиоканала. Практическая значимость исследования состоит в повышении точности прогнозирования статистических характеристик оценок занятости радиоканалов и полос частот, что в конечном итоге способствует ускорению измерений и экономии ресурсов, затрачиваемых службами радиоконтроля на анализ радиобстановки

Ключевые слова: радиоконтроль, занятость радиочастотного спектра, методика оценивания, закон распределения количества сигналов

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-20034, <https://rscf.ru/project/24-21-20034/>

Введение

Занятость радиочастотного спектра определяет вероятность того, что в случайно выбранный момент времени радиоканал или полоса частот будет использоваться для передачи информации [1]. Измерения занятости должны удовлетворять определенным требованиям по точности и надёжности оценивания. Анализ надёжности оценивания базируется на определенной статистической модели, отражающей основные свойства и особенности осуществляемых измерений. Применительно к измерениям занятости подобная модель должна учитывать истинную занятость радиоканалов, стабильность или нестабильность длительностей наблюдаемых радиосигналов и пауз между ними, характер группирования сигналов вдоль оси времени.

Следует признать, что достоверная информация о статистических свойствах потока выхо-

дов в эфир сигналов в анализируемом радиоканале, как правило, отсутствует (если бы характер сигналов в канале был заранее достоверно известен, то не возникала бы и необходимость в оценивании занятости). Как следствие, относительно уверенные прогнозы могут касаться лишь типовой продолжительности сигналов в канале и приближенного значения ожидаемой занятости. Что же касается свойств самого потока выходов в эфир, то часто для упрощения рассуждений его считают близким к пуассоновскому. Однако при разработке требований к продолжительности сбора данных, обеспечивающей достоверное измерение занятости, даже не слишком значительное отклонение свойств потока от пуассоновского может приводить к ошибкам при определении необходимой продолжительности сбора данных, а значит, к перерасходу ресурсов на проведение измерений.

Отметим, что рассчитывать на стабильность продолжительности пребывания сигналов в эфире можно лишь в редких случаях. Чаще длительности сеансов связи демонстрируют заметный

разброс. Практичной статистической моделью, позволяющей смоделировать подобные выходы в эфир, является предположение о том, что длительности сигналов и пауз между ними могут подчиняться показательным распределениям

$$W_{\tau}(t) = \frac{1}{\lambda_a} \cdot \exp\left\{-\frac{t}{\lambda_a}\right\}, \quad (1)$$

$$W_{\theta}(t) = \frac{1}{\lambda_p} \cdot \exp\left\{-\frac{t}{\lambda_p}\right\}, \quad (2)$$

где τ – случайная продолжительность выхода в эфир (длительность активного состояния канала); λ_a – типовая продолжительность сигналов в канале; θ – случайная продолжительность паузы между сигналами (длительность пассивного состояния канала); λ_p – средняя продолжительность пауз между сигналами (рис. 1).

Подобная модель используется, в частности, в классической работе по исследованию надёж-

ности оценок занятости [1], где в центре внимания находятся радиоканалы с занятостью до 10 %. Учитывая, что при известных математических ожиданиях продолжительности сигналов и пауз (λ_a и λ_p) истинное значение занятости составит

$$SO = \frac{\lambda_a}{\lambda_a + \lambda_p}, \quad (3)$$

исследование занятости $SO < 10\%$ означает, что длительности сигналов оказываются весьма малыми по отношению к длительностям пауз. А это означает, что интервал Δ между моментами появления в эфире смежных сигналов фактически определяется длительностью соответствующей паузы $\Delta_i \approx \theta_i$. Тогда интервал Δ оказывается фактически подчиняющимся показательному распределению, а потому и гипотеза о пуассоновском характере потока появления сигналов в эфире хорошо согласуется с моделями (1)-(2) продолжительностей сигналов и пауз.

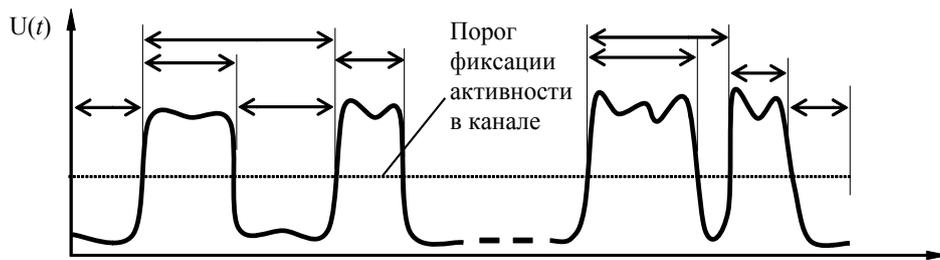


Рис. 1. Возможное распределение сигналов и пауз в радиоканале при оценивании занятости (в случае непрерывного мониторинга состояния радиоканала)

Вместе с тем, для радиоканалов с занятостью $SO > 10\%$ оказывается уже некорректно пренебрегать влиянием длительностей сигналов на величину интервала Δ между выходами в эфир, а потому и считать поток выходов в эфир сохраняющим строго пуассоновский характер опасно (рис. 2).

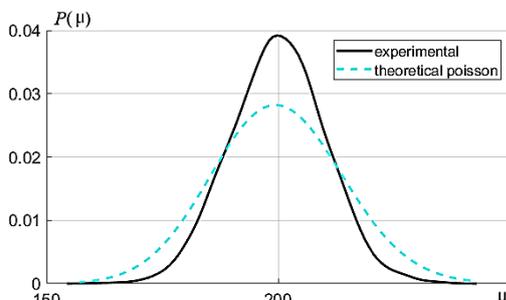


Рис. 2. Распределение числа выходов сигналов в эфир и теоретическое распределение Пуассона для канала с занятостью $SO = 50\%$

Цель настоящей работы состоит в исследовании зависимости свойств распределения,

характеризующего наблюдаемое количество сигналов на интервале сбора данных, от его протяженности и от занятости радиоканала SO применительно к модели (1)-(2) продолжительностей сигналов и пауз.

Причины деформации закона распределения количества сигналов в канале, выходящих в эфир на интервале сбора данных

Известно [2], что если интервалы между событиями потока являются независимыми случайными величинами с показательным законом распределения, то поток событий оказывается пуассоновским. Для такого потока, количество событий L , наблюдаемых на интервале длительностью T , характеризуется вероятностью

$$P(L) = \frac{\mu^L}{L!} \cdot e^{-\mu}, \quad L \geq 0, \quad (4)$$

где μ – интенсивность потока, составляющая

$$\mu = \lambda \cdot T. \quad (5)$$

Здесь λ – среднее количество событий, происходящих на временной интервал единичной длительности.

При исследованиях свойств оценок занятости на основе модели (1)-(2) следует учесть, что интервал Δ_i между событиями потока определяется суммой

$$\Delta_i = \tau_i + \theta_i, \quad (6)$$

т.е. является [2] случайной величиной с законом распределения

$$W_{\Delta}(z) = \begin{cases} \frac{\lambda_p \lambda_a}{\lambda_p - \lambda_a} (e^{-\lambda_a z} - e^{-\lambda_p z}) & \text{при } \lambda_p > \lambda_a, \\ \lambda^2 z e^{-\lambda z} & \text{при } \lambda_p = \lambda_a = \lambda, \end{cases} \quad (7)$$

и числовыми характеристиками

$$M_{\Delta} = \lambda_a + \lambda_p; \sigma_{\Delta} = \sqrt{\lambda_p + \lambda_a} = \sqrt{M_{\Delta}}. \quad (8)$$

Вид плотности вероятности величины Δ при разных соотношениях между λ_a и λ_p , что соответствует разным значениям занятости SO , показан на рис. 3.

Сопоставим свойства двух потоков событий, в одном из которых интервал между событиями задаётся величинами θ_i , а в другом – Δ_i .

Показательный закон распределения характеризуется числовыми характеристиками

$$M_{\theta} = \lambda_p; \sigma_{\theta} = \lambda_p = M_{\theta}. \quad (9)$$

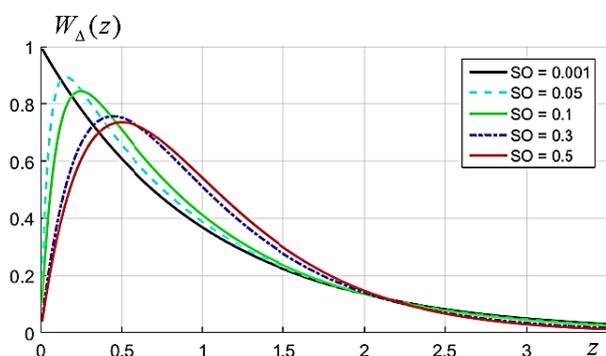


Рис. 3. Компрессия закона распределения интервала между выходами сигналов в эфир при повышении занятости канала SO

Это означает, что в случае совпадения $M_{\theta} = M_{\Delta} = M_1$ (временно нарушим соотношение (6)) эффективные значения интервалов между моментами выходов в эфир будут заметно отличаться

$$\sigma_{\theta} / \sigma_{\Delta} = \sqrt{M_1}, \quad (10)$$

а значит интервалы между событиями в потоке, базирующемся на Δ_i , будут заметно стабильнее по величине, чем интервалы в потоке, базирующемся на θ_i . Таким образом, если стандартный пуассоновский поток характеризуется параметрами распределения

$$M_L = \mu, \quad \sigma_L = \sigma_{Pois} = \sqrt{\mu}, \quad (11)$$

то поток событий, базирующихся на интервалах Δ_i , будет демонстрировать более стабильное количество сигналов на интервале сбора данных и меньшее эффективное значение σ_L .

Выбор аппроксимирующей модели

Известно [3], что для обеспечения достоверности измерений занятости требуется, чтобы на интервале сбора данных умещалось несколько сотен сигналов L . При выполнении соотношения $\mu \gg 1$ закон Пуассона можно с высокой точностью аппроксимировать нормальным распределением с параметрами, определяемыми (11). И изменение свойств величин Δ_i (по отношению к показательному распределенным θ_i) при анализе радиоканалов с занятостью $SO > 10\%$ проявит себя прежде всего в уменьшении эффективного значения нормального распределения по отношению к (11). В справедливости подобного предположения можно легко убедиться с помощью статистического моделирования. Полученные при разных значениях занятости SO статистические характеристики количества L выходов в эфир сигналов на интервале сбора данных показаны на рис. 4-6.

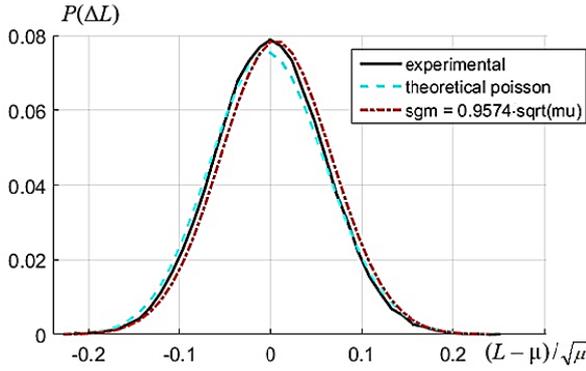


Рис. 4. Распределение числа выходов сигналов в эфир для канала с занятостью $SO = 4\%$

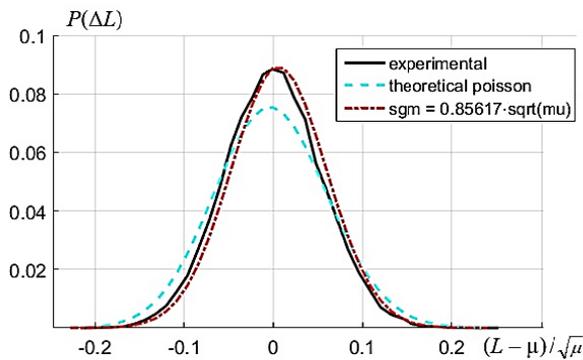


Рис. 5. Распределение числа выходов сигналов в эфир для канала с занятостью $SO = 16\%$

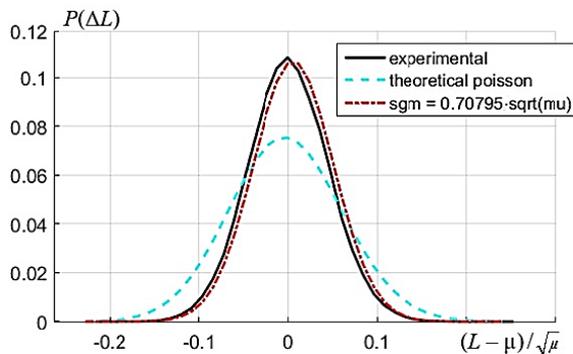


Рис. 6. Распределение числа выходов сигналов в эфир для канала с занятостью $SO = 50\%$

На рис. 4-6 сплошные черные линии соответствуют результатам статистического моделирования для нормированных отклонений L от математического ожидания μ и отражают сглаженную зависимость вероятности появления на интервале сбора данных того или иного количества сигналов (выходов в эфир). Светлым пунктиром показаны аналогичные зависимости, рассчитанные в соответствии с распределением Пуассона, а красные штрихпунктирные линии соответствуют кривым нор-

мального распределения, параметр σ_L которого подбирался в соответствии с дисперсией экспериментально полученной зависимости. Сравнительный анализ зависимостей показывает, что при занятоści менее 10 % (рис. 4) различия между всеми тремя графиками не являются значительными, т.е. для предсказания количества сигналов, которые будут возникать на интервале сбора данных, можно использовать как само распределение Пуассона, так и аппроксимирующее его нормальное распределение с параметром σ_L лишь чуть меньшим, чем указывается в (11). При занятоści $0,1 \leq SO \leq 0,2$ (рис. 5) использование пуассоновского распределения уже вряд ли можно считать оправданным, т.к. получаемое при статистическом моделировании эффективное значение σ_L оказывается на 15 % меньше, чем ожидается согласно (11), т.е. уже вполне отчетливо проявляется эффект «компрессии» пуассоновского распределения. И, наконец, повышение стабильности и снижение σ_L в наибольшей степени проявляет себя при $SO \approx 50\%$, когда реальный закон распределения оказывается существенно сжатым по отношению к пуассоновскому (с уменьшением σ_L примерно на 30 %).

Исследование зависимости числовых характеристик аппроксимирующего нормального распределения от занятоści показывает, что для использования на практике может быть рекомендовано соотношение

$$M_L = \mu, \sigma_L = \sigma_{Pois} \cdot \left\{ \sqrt{0,5 + 1,25 \cdot (SO - 0,5)^2} \right\}. \quad (12)$$

Соответствующая зависимость вместе с набором результатов статистического моделирования показана на рис. 7 и иллюстрирует отличную сходимость аппроксимирующего выражения (12) с экспериментальными данными.

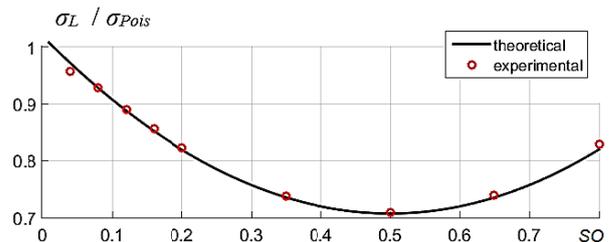


Рис. 7. Коэффициент коррекции эффективного значения для количества сеансов связи на интервале сбора данных при различной занятоści SO

Заключение

Внедрению в практику радиоконтроля циклостационарной методики оценивания занятости радиоканалов [4] препятствует неразвитость методики обеспечения статистической достоверности подобных измерений. Непосредственный расчет достоверности оценок, формируемых в соответствии с циклостационарной моделью, осложняется неопределенностью в отношении статистических характеристик как сеансов выхода радиостанций в эфир, так и пауз между сигналами, а представленные в литературе подходы хотя и определяют практические направления исследований, но при перепроверке демонстрируют недостаточную точность.

В частности, часто упоминаемая в статьях пуассоновская модель потока выходов сигналов в эфир оказывается весьма удачной при анализе радиоканалов, занятость которых не превышает 10 %. Однако по мере роста занятости свойства потока сигналов всё более заметно отклоняются от строго пуассоновских, а потому исследование достоверности измерений на основе закона распределения Пуассона сопровождается пусть и не критически большой, но вполне заметной погрешностью.

В настоящей работе предложено аппроксимировать статистические показатели количе-

ства выходов в эфир сигналов на протяжении интервала сбора данных нормальным распределением и получено правило определения параметров подобного распределения, демонстрирующее весьма точное соответствие теоретического предсказания результатам статистического моделирования.

Результаты проведенного исследования смогут послужить основой для разработки новой методики обеспечения достоверности измерений занятости радиочастотных каналов на основе циклостационарной модели изменения занятости.

Литература

1. Spaulding A.D., Hagn G.H. On the Definition and Estimation of Spectrum Occupancy // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1977. Vol. EMC-19. Is. 3. pp. 269-280.
2. Положинцев Б.И. Теория вероятностей: учеб. пособие; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. СПб., 2020. 108 с.
3. Продолжительность сбора данных при измерениях занятости стационарных радиоканалов / А.Б. Токарев, В.А. Козьмин, А.П. Павлюк, В.Ю. Полев // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 1. С. 43-58.
4. Токарев А.Б., Останков А.В., Полев В.Ю. Методика измерения занятости радиочастотного спектра, изменяющейся в соответствии с суточным циклом // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 43-49.

Поступила 30.05.2025; принята к публикации 09.06.2025

Информация об авторах

Полев Виктор Юрьевич – аспирант кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); старший конструктор, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14). e-mail: victor.polev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1902-7207>

Козьмин Владимир Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, директор по науке, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б), e-mail: kozminVA@ircos.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5268-1114>

Токарев Антон Борисович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); старший научный сотрудник, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б), e-mail: tokarevab@ircos.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-4336>

DISTRIBUTION OF THE NUMBER OF SIGNALS OBSERVED IN THE DATA GATHERING INTERVAL WHEN MEASURING THE OCCUPANCY OF THE RADIO FREQUENCY SPECTRUM

V.Yu. Polev^{1,2}, V.A. Kozmin³, A.B. Tokarev^{1,3}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²JSC «Constellation «Sozvezdie», Voronezh, Russia

³JSC «IRCOS», Voronezh, Russia

Abstract: one of the important tasks solved by radio monitoring services is to measure the occupancy of radio channels and frequency bands. The documents of the International Telecommunication Union (ITU-R) regulating the measurement of occupancy, when analyzing the accuracy and reliability of measurements, are based on the statement of requirements for the

number of the radio channel state control points during the measurement interval. However, the analysis shows that, first of all, the reliability of the occupancy measurements depend on the number of signals in the channel located at the data gathering interval. In the scientific literature, when analyzing this indicator, which is random in nature, it is most often assumed that the number of signals obeys the Poisson distribution law. However, a more detailed analysis shows that even with a fixed statistical model of signal flow formation, the real distribution law of the number of signals over the measurement interval may vary, deviating from the Poisson one. The aim of the work is to study the dependence of the distribution indicators of the observed number of signals on the duration of the data gathering interval and the occupancy of the radio channel. The practical significance of the study is to increase the accuracy of forecasting statistical characteristics of occupancy estimates of radio channels and frequency bands, which ultimately contributes to accelerating measurements and saving resources spent by radio control services on analyzing radio environment

Key words: radio monitoring, radio frequency spectrum occupancy, assessment methodology, distribution law of the number of signals

Acknowledgments: the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-21-20034, <https://rscf.ru/project/24-21-20034/>

References

1. Spaulding A.D., Hagn G.H. "On the definition and estimation of spectrum occupancy", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1977, vol. EMC-19, issue 3, pp. 269–280.
2. Polozhintsev B.I. "Probability theory" ("Teoriya veroyatnostey"), Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), 2020, 108 p.
3. Tokarev A.B., Kozmin V.A., Pavlyuk A.P., Polev V.Yu. "Duration of data collection when measuring occupancy of stationary radio channels", *Systems of Control, Communication and Security (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2024, no. 1, pp. 43-58.
4. Tokarev A.B., Ostankov A.V., Polev V.Yu. "The method of measuring the occupancy of the radio frequency spectrum, varying according to the daily cycle", *Works of Telecommunication Universities (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2024, no. 10(5), pp. 43-49.

Submitted 30.05.2025; revised 09.06.2025

Information about the authors

Viktor Yu. Polev, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Senior designer of Joint-stock company «Constellation «Sozvezdie» (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: victor.polev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1902-7207>

Vladimir Al. Kozmin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Scientific Directors, JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: kozminVA@ircos.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5268-1114>

Anton B. Tokarev, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Senior Staff Scientist, JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-4336>

МОДЕЛЬ ОТРАЖЕНИЯ ЭХО-СИГНАЛА ОТ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ МНОГОЧАСТОТНОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Д.Ю. Набережнев¹, С.С. Матвеев¹, Ю.В. Литвиненко²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрен вопрос разработки модели отражения эхо-сигнала от многослойной подстилающей поверхности при вертикальном многочастотном зондировании. Исследуется применение радиоимпульсов с различными частотами для дистанционного зондирования земной поверхности, при этом особое внимание уделяется распространению, отражению и преломлению электромагнитных волн на границах однородных сред. При математическом моделировании процесса отражения сигнала основное внимание уделено выводу коэффициентов отражения для верхней и нижней границ слоёв. Представлены формулы для расчёта коэффициентов зеркального отражения, учитывающие диэлектрические свойства сред и углы падения волн. Модель также учитывает фазовые сдвиги и взаимодействие сигналов, отражённых от разных границ, что позволяет разделить их вклад в результирующий эхо-сигнал. Работа отличается от существующих аналогов учётом компонент сигнала, отражённых от разных слоёв подстилающей поверхности, что повышает точность измерений параметров каждого слоя, включая его толщину. Рассмотрены теоретические выкладки, подтверждённые граничными условиями уравнений Максвелла, и иллюстрируется практическая применимость модели для решения прикладных задач. На основе предложенной модели может быть разработан метод дистанционного зондирования для изучения многослойных структур земной поверхности. Результаты работы имеют значение для развития методов дистанционного зондирования и могут быть использованы в геофизике, экологическом мониторинге

Ключевые слова: дистанционное зондирование земной поверхности, многочастотное зондирование, коэффициент отражения, волновой коэффициент

Введение

Многочастотное зондирование земной поверхности производится в интересах получения информации о состоянии многослойной подстилающей поверхности [1]. В процессе зондирования производится облучение радиоимпульсами с разной несущей частотой от 10 до 1500 МГц. При этом глубина проникновения электромагнитной волны (ЭМВ) в многослойную структуру поверхности зависит от ее диэлектрической и магнитной проницаемости и длины волны. Разные частоты зондирующего сигнала используются для повышения разрешающей способности и увеличения глубины проникновения сигнала.

Модель отражения

При этом зондирующий сигнал можно представить в виде

$$s_{\Sigma}(t, f) = \sum_f \{s_1(t, f) + s_2(t, f)\}. \quad (1)$$

Уравнение для сигнала одной частоты выражается следующим

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t), \quad (2)$$

где $s_1(t)$ – сигнал, отраженный от верхней границы слоя, $s_2(t)$ – сигнал, отраженный от нижней границы слоя. При этом составляющие в (2) определяются как

$$\begin{aligned} s_1(t) &= E_1 K_{12} e^{j\varphi(t)}, \\ s_2(t) &= E_1 (K_{fc} - K_{12}) e^{j\varphi(t)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где E_1 – напряженность поля зондирующего сигнала, K_{12} – коэффициент зеркального отражения от верхней границы слоя, K_{fc} – коэффициент зеркального отражения от слоя в целом.

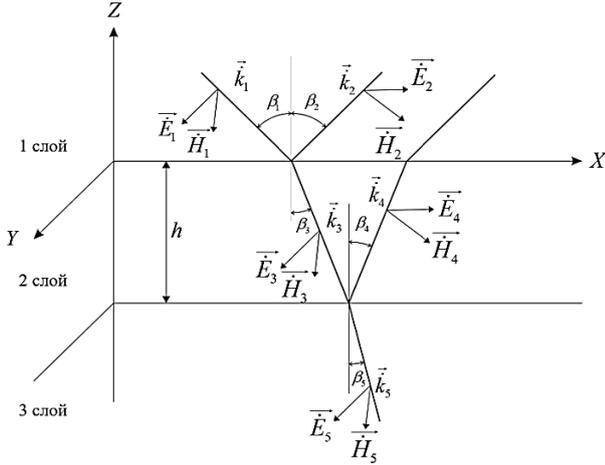


Рис. 1. Распространение эхо-сигнала $s(t)$

Для определения слагаемых выражения (3) рассмотрим отражение электромагнитной волны (ЭМВ) от верхней границы слоя. Будем считать, что каждая из рассматриваемых сред однородна, а границы между ними фиксированы.

Для этого выберем прямоугольную систему координат так, чтобы в плоскости XOY находилась граница раздела двух сред, а плоскость падения волны совпадала с плоскостью XOZ [2]. Предположим, что верхняя среда характеризуется диэлектрической проницаемостью $\dot{\epsilon}_{k1}$, нижняя среда $\dot{\epsilon}_{k2}$, а направление распространения сигнала определяется углом визирования β_1 . Тогда волновой вектор запишем как:

$$\vec{k}_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k1}} (\vec{x}_0 \sin \beta_1 - \vec{z}_0 \cos \beta_1), \quad (4)$$

$\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0$ – единичные векторы прямоугольной системы координат.

Учитывая, что радиус-вектор равен $R = x\vec{x}_0 + y\vec{y}_0 + z\vec{z}_0$, получим выражение для плоской горизонтально-поляризованной волны, падающей на границу раздела сред:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= \vec{y}_0 \dot{E}_{01} e^{-jk_1(x \sin \beta_1 - z \cos \beta_1)}, \\ \vec{H}_1 &= \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{k1}}{\mu_0}} \dot{E}_{01} (-\vec{x}_0 \cos \beta_1 - \vec{z}_0 \sin \beta_1) e^{-jk_1(x \sin \beta_1 - z \cos \beta_1)}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_2 &= \vec{y}_0 \dot{E}_{02} e^{-jk_2(x \sin \beta_2 + z \cos \beta_2)}, \\ \vec{H}_2 &= \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{k2}}{\mu_0}} \dot{E}_{02} (\vec{x}_0 \cos \beta_2 - \vec{z}_0 \sin \beta_2) e^{-jk_2(x \sin \beta_2 + z \cos \beta_2)}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_3 &= \vec{y}_0 \dot{E}_{03} e^{-jk_3(x \sin \beta_3 - z \cos \beta_3)}, \\ \vec{H}_3 &= \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{k3}}{\mu_0}} \dot{E}_{03} (-\vec{x}_0 \cos \beta_3 - \vec{z}_0 \sin \beta_3) e^{-jk_3(x \sin \beta_3 - z \cos \beta_3)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\dot{E}_{01}, \dot{E}_{02}, \dot{E}_{03}$ – комплексные амплитуды,
 $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k1}}, k_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}}$.

Согласно граничным условиям уравнений Максвелла, тангенциальные составляющие электрического поля при $z = 0$ должны удовлетворять следующему соотношению

$$\dot{E}_{1y} + \dot{E}_{2y} = \dot{E}_{3y}, \quad (8)$$

которое при подстановке соответствующих членов из (5-7) представляется как

$$\dot{E}_{01} e^{-jk_1 x \sin \beta_1} + \dot{E}_{02} e^{-jk_2 x \sin \beta_2} = \dot{E}_{03} e^{-jk_3 x \sin \beta_3}. \quad (9)$$

Так как выражение (9) должно выполняться при любых x , то:

$$\sqrt{\dot{\epsilon}_{k1}} \sin \beta_1 + \sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}} \sin \beta_2 = \sqrt{\dot{\epsilon}_{k3}} \sin \beta_3. \quad (10)$$

Откуда следует, что углы $\beta_1 = \beta_2$, отражение происходит зеркально, а выражение (9) принимает вид

$$\dot{E}_{01} + \dot{E}_{02} = \dot{E}_{03}. \quad (11)$$

В соответствии с граничными условиями для тангенциальных составляющих магнитного поля

$$\dot{H}_{1x} + \dot{H}_{2x} = \dot{H}_{3x} \quad (12)$$

или

$$\begin{aligned} &-\sqrt{\dot{\epsilon}_{k1}} \dot{E}_{01} \cos \beta_1 e^{-jk_1 x \sin \beta_1} + \\ &+\sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}} \dot{E}_{02} \cos \beta_2 e^{-jk_2 x \sin \beta_2} = \\ &= -\sqrt{\dot{\epsilon}_{k3}} \dot{E}_{03} \cos \beta_3 e^{-jk_3 x \sin \beta_3} \end{aligned} \quad (13)$$

с учетом (10) получаем

$$\dot{E}_{01} \cos \beta_1 - \dot{E}_{02} \cos \beta_1 = \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{k2}}{\dot{\epsilon}_{k1}}} \dot{E}_{03} \cos \beta_3. \quad (14)$$

В таком случае получим коэффициент зеркального отражения от верхней границы слоя, понимая под ним отношение амплитуд отраженного и падающего лучей на границе раздела первых двух сред. Величину коэффициента получим из совместного решения уравнения (11) и (14):

$$\dot{K}_{12} = \frac{\dot{E}_{02}}{\dot{E}_{01}} = \frac{\cos \beta_1 - \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{k2}}{\dot{\epsilon}_{k1}}} \cos \beta_3}{\cos \beta_1 + \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{k2}}{\dot{\epsilon}_{k1}}} \cos \beta_3}. \quad (15)$$

Учитывая, что $\sin \beta_3 = \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{k1}}{\dot{\epsilon}_{k2}}} \sin \beta_1$,

$\cos \beta_3 = \sqrt{1 - \frac{\dot{\epsilon}_{k1}}{\dot{\epsilon}_{k2}} \sin^2 \beta_1}$, выражение (15) преобразуется к виду:

$$\dot{K}_{12} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_{k1}} \cos \beta_1 - \sqrt{\dot{\epsilon}_{k2} - \dot{\epsilon}_{k1} \sin^2 \beta_1}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_{k1}} \cos \beta_1 + \sqrt{\dot{\epsilon}_{k2} - \dot{\epsilon}_{k1} \sin^2 \beta_1}}. \quad (16)$$

При наличии второй границы раздела сред с диэлектрической проницаемостью третьего слоя $\dot{\epsilon}_{k3}$ и толщиной h (рис. 1) дополнительно формируются ЭМВ

$$\begin{aligned} \vec{E}_4 &= \vec{y}_0 \dot{E}_{04} e^{-jk_2(x \sin \beta_4 + z \cos \beta_4)}, \\ \vec{H}_4 &= \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{k2}}{\mu_0}} \dot{E}_{04} (\vec{x}_0 \cos \beta_4 - \vec{z}_0 \sin \beta_4) e^{-jk_2(x \sin \beta_4 + z \cos \beta_4)}, \quad (17) \\ \vec{E}_5 &= \vec{y}_0 \dot{E}_{05} e^{-jk_3(x \sin \beta_5 - z \cos \beta_5)}, \\ \vec{H}_5 &= \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_{k3}}{\mu_0}} \dot{E}_{05} (-\vec{x}_0 \cos \beta_5 - \vec{z}_0 \sin \beta_5) e^{-jk_3(x \sin \beta_5 - z \cos \beta_5)}. \quad (18) \end{aligned}$$

В соответствии с граничными условиями значения тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей на верхней границе слоя $z = 0$ должны равняться нулю, т.е.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1y} + \dot{E}_{2y} + \dot{E}_{3y} + \dot{E}_{4y} &= 0, \\ \dot{H}_{1x} + \dot{H}_{2x} + \dot{H}_{3x} + \dot{H}_{4x} &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Подставляя в выражение (19) значения составляющих поля из (5-7) и (17) для $z = 0$ и учитывая, что эти условия должны соблюдаться при любых значениях x , находим, что

$$\beta_1 = \beta_2, \quad (20)$$

$$\beta_3 = \beta_4, \quad (21)$$

$$\sqrt{\dot{\epsilon}_{k1}} \sin \beta_1 = \sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}} \sin \beta_3, \quad (22)$$

при этом условия (19) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} \dot{E}_{01} + \dot{E}_{02} + \dot{E}_{03} + \dot{E}_{04} &= 0, \\ -\dot{E}_{01} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k1}} \cos \beta_1 + \dot{E}_{02} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k1}} \cos \beta_1 - \\ -\dot{E}_{03} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}} \cos \beta_3 + \dot{E}_{04} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}} \cos \beta_3 &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Запишем граничные условия на нижней границе слоя $z = -h$:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{3y} + \dot{E}_{4y} + \dot{E}_{5y} &= 0, \\ \dot{H}_{3x} + \dot{H}_{4x} + \dot{H}_{5x} &= 0. \end{aligned} \quad (24)$$

По аналогии с предыдущим получаем, что

$$\sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}} \sin \beta_3 = \sqrt{\dot{\epsilon}_{k3}} \sin \beta_5,$$

при этом условия (24) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} \dot{E}_{03} e^{-jk_2 h \cos \beta_3} + \dot{E}_{04} e^{-jk_2 h \cos \beta_3} + \dot{E}_{05} e^{-jk_2 h \cos \beta_3} &= 0, \\ -\dot{E}_{03} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}} \cos \beta_3 e^{-jk_2 h \cos \beta_3} + \\ + \dot{E}_{04} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}} \cos \beta_3 e^{-jk_2 h \cos \beta_3} - \\ - \dot{E}_{05} \sqrt{\dot{\epsilon}_{k3}} \cos \beta_5 e^{-jk_2 h \cos \beta_3} &= 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Решая систему уравнений (23) и (25) и используя выражения для границ коэффициентов зеркального отражения двух сред, получаем уравнение коэффициента отражения от слоя

$$\dot{K}_{jc} = \frac{\dot{E}_{02}}{\dot{E}_{01}} = \frac{\dot{K}_{12} + \dot{K}_{23} e^{-jk_2 2h \cos \beta_3}}{1 + \dot{K}_{12} \dot{K}_{23} e^{-jk_2 2h \cos \beta_3}}. \quad (26)$$

Если учесть, что $\dot{\epsilon}_{k2} = \epsilon_2 (1 - jtg \delta_n)$, а $\sin \beta_3 = \frac{\sin \beta_1}{\sqrt{\dot{\epsilon}_{k2}}}$, то можно записать следующее:

$$k_2 \cos \beta_3 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2 \beta_1 - j\epsilon_2 tg \delta_n} = k_{21} - jk_{22}. \quad (27)$$

С достаточной точностью можно выразить следующее:

$$\begin{aligned} k_{21} &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2}, \\ k_{22} &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2} \frac{tg \delta_n}{2}. \end{aligned} \quad (28)$$

В этом случае выражение (26) принимает вид

$$\dot{K}_{fc} = \frac{\dot{K}_{12} + \dot{K}_{23} e^{-\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} \delta_n h} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} h}}{1 + \dot{K}_{12} \dot{K}_{23} e^{-\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} \delta_n h} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} h}}. \quad (29)$$

Поскольку $|\dot{\varepsilon}_{k3}| > |\dot{\varepsilon}_{k2}| > |\dot{\varepsilon}_{k1}|$, то $|\dot{K}_{12}| |\dot{K}_{23}| \ll 1$. Тогда формулу (29) представим в виде

$$\dot{K}_{fc} = \dot{K}_{12} + \dot{K}_{23} (1 - \dot{K}_{12}^2) e^{-j2k_3 h} - \dot{K}_{23}^2 \dot{K}_{12} e^{-j4k_3 h}. \quad (30)$$

С учетом того, что напряженность электрического поля и напряжение на выходе антенны связаны соотношением

$$U = E \sqrt{\frac{R_a S_a}{120\pi}} G_{\text{прм}}(\gamma, \beta), \quad (31)$$

получаем

$$\begin{aligned} s_1(t) &= -\frac{jQ_0}{\lambda R_0^2} K_{12} \sqrt{\frac{R_a S_a}{120\pi}} G_{\text{прм}}(\gamma, \beta) e^{-j(k2R_0 - \theta_0)} \times \\ &\int\limits_{x,y} G(\alpha, \beta) \cos \beta e^{-jk2(R'_1 - R_0)} dx dy, \\ s_2(t) &= -\frac{jQ_0}{\lambda R_0^2} (K_{fc} - K_{12}) \sqrt{\frac{R_a S_a}{120\pi}} G_{\text{прм}}(\gamma, \beta) e^{-j(k2R_0 - \theta_0)} \times \\ &\int\limits_{x,y} G(\alpha, \beta) \cos \beta e^{-jk2(R'_1 - R_0)} dx dy, \end{aligned} \quad (32)$$

где $Q_0 = \sqrt{60P_a G_0}$, $G(\alpha, \beta)$ – диаграмма направленности антенны, λ – длина волны зонди-

рующего сигнала, θ_0 – аргумент, определяющий фазовый сдвиг за счет отражения, R_a – активное сопротивление антенны, S_a – эффективная площадь антенны, $G_{\text{прм}}(\gamma, \beta)$ – коэффициент усиления приемной антенны.

Заключение

Таким образом, выражения (1)–(3) и (31) представляют собой модель отражения эхосигнала от подстилающей поверхности при вертикальном многочастотном зондировании. Разработанная модель, в отличие от существующих [3], учитывает компоненты сигнала, отраженного от подстилающей поверхности. За счет вычисления коэффициентов отражения от границы и слоя становится возможным разграничить составляющие сигнала и произвести их расчет.

На основе данной математической модели может быть разработан способ дистанционного зондирования многослойной земной поверхности с измерением параметров каждого слоя, в том числе, его толщины.

Литература

1. Райкунов Г.Г. Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании / Г.Г. Райкунов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 135 с.
2. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн / С.И. Баскаков. М.: Высшая школа, 1992. 416 с.
3. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности / С.Г. Зубкович. М.: Советское радио, 1968. 223 с.

Поступила 21.04.2025; принята к публикации 30.05.2025

Информация об авторах

Набережнев Дмитрий Юрьевич – адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: dimnabr@yandex.ru

Матвеев Сергей Сергеевич – адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: gres02@yandex.ru

Литвиненко Юлия Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: j.v.litvinenko@yandex.ru

MODEL OF ECHO REFLECTION FROM THE UNDERLYING SURFACE WITH VERTICAL MULTI-FREQUENCY SENSING

D.Yu. Naberezhnev¹, S.S. Matveev¹, Yu.V. Litvinenko²

¹Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article addresses the development of a model for echo signal reflection from a multilayer underlying surface during vertical multi-frequency sounding. It also investigates the use of radio pulses with different frequencies for remote sensing of the Earth's surface, with particular attention paid to the propagation, reflection, and refraction of electromagnetic waves at the boundaries of homogeneous media. In the mathematical modeling of the signal reflection process, the primary focus is on deriving reflection coefficients for the upper and lower boundaries of the layers. We presented formulas for calculating specular reflection coefficients, taking into account the dielectric properties of the media and the angles of wave incidence. The model also considers phase shifts and the interaction of signals reflected from different boundaries, enabling the separation of their contributions to the resulting echo signal. The scientific work differs from existing analogues by accounting for signal components reflected from different layers of the underlying surface, thereby improving the accuracy of measuring the parameters of each layer, including its thickness. We examined theoretical derivations, supported by the boundary conditions of Maxwell's equations and illustrated the practical applicability of the model for solving applied problems. Based on the proposed model, a method for remote sensing of multilayer Earth surface structures can be developed. The results of the study are significant for advancing remote sensing techniques and can be applied in geophysics, environmental monitoring, and other fields

Key words: remote sensing of the Earth's surface, multi-frequency sensing, reflection coefficient, wave coefficient

References

1. Raykunov G.G. "Hyperspectral remote sensing in geological mapping" ("Giperspektral'noe distantsionnoe zondirovanie v geologicheskom kartirovanii"), Moscow: Fizmatlit, 2014, 135 p.
2. Baskakov S.I. "Electrodynamics and propagation of radio waves" ("Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln"), Moscow: Vysshaya shkola, 1992, 416 p.
3. Zubkovich S.G. "Statistical characteristics of radio signals reflected from the Earth's surface" ("Statisticheskie kharakteristiki radiosignalov, otrazhennykh ot zemnoy poverkhnosti"), Moscow: Sovetskoe Radio, 1968, 223 p.

Submitted 21.04.2025; revised 30.05.2025

Information about the authors

Dmitriy Yu. Naberezhnev, graduate student, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy» (54a Starih Bolshevikov str., Voronezh 39064, Russia), e-mail: dimnabr@yandex.ru
Sergey S. Matveev, graduate student, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy» (54a Starih Bolshevikov str., Voronezh 39064, Russia), e-mail: gres02@yandex.ru
Yulia V. Litvinenko, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: j.v.litvinenko@yandex.ru

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ LDPC И BCH КОДОВ НА ОСНОВЕ ОБУЧАЕМЫХ ГРАФОВЫХ АРХИТЕКТУР**М.В. Хорошайлова, А.В. Турецкий****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: представлена полностью дифференцируемая архитектура графовой нейронной сети (GNN), предназначенная для задач декодирования каналов связи. Разработанный подход демонстрирует сопоставимую с традиционными методами эффективность декодирования для различных классов корректирующих кодов, включая коды низкой плотности проверки на четность (LDPC) и коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (BCH), при существенном сокращении требуемого количества итераций. Каждая итерация декодирования представлена как слой графовой нейронной сети. Суть метода заключается в замене детерминированных операций передачи сообщений в классических декодерах на адаптивные нейросетевые блоки, которые в процессе обучения самостоятельно выявляют оптимальные правила обработки данных в структуре кодового графа. В отличие от большинства существующих решений на основе глубокого обучения, предложенная архитектура обладает такими преимуществами, как масштабируемость для кодов произвольной длины и отсутствие ограничений, связанных с проблемами размерности. Экспериментальные результаты показывают значительное превосходство предложенной методики для кода BCH (63,45), достигнуто улучшение с максимальным выигрышем в области высоких SNR (4-5 дБ) по сравнению с взвешенным алгоритмом распространения доверия (BP), а для LDPC(128, 64)-кодов стандарта 5G NR преимущество достигает 36-87 %, особенно заметное при SNR > 2 дБ

Ключевые слова: графовые нейронные сети, низкоплотностное кодирование, код Боуза-Чоудхури-Хоквингема, алгоритмом распространения доверия, масштабируемость

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003

Введение

Глубокое обучение (ГО) приобретает все большее значение в различных областях, особенно в контексте обработки изображений, беспроводных коммуникаций, распознавания речи и других направлений. В частности, ГО находит применение в системах обратной связи по информации о состоянии канала (CSI) в многоканальных системах с множественным входом и множественным выходом (MIMO), интеллектуальных отражающих поверхностях и алгоритмах декодирования каналов [1]. Несмотря на улучшение производительности по коэффициенту битовых ошибок (BER), ГО часто требует значительных ресурсов для хранения и вычислений по сравнению с традиционными алгоритмами декодирования.

В алгоритмах декодирования для кодов LDPC, Хэмминга и BCH часто используются графы Таннера и факторные графы. Традиционные алгоритмы, такие как belief propagation (BP), несмотря на свою широкую распространенность, обладают существенными ограничениями, включая высокую вычислительную сложность и субоптимальную производитель-

ность в условиях коротких циклов графа Таннера [2]. В последние годы методы глубокого обучения открыли новые перспективы для решения задач декодирования, однако большинство существующих нейросетевых подходов сталкиваются с проблемами при работе с высокоразмерными пространствами и кодами большой длины.

В данной работе полностью дифференцируемая архитектура на основе графовых нейронных сетей (GNN), которая кодирует каждую итерацию декодирования как слой нейронной сети, заменяет жесткие правила передачи сообщений обучаемыми нейросетевыми операторами и автоматически выявляет оптимальные стратегии обработки информации в графе кода [3].

Алгоритм декодирования каналов на основе графовой нейронной сети

Рассматриваемые в работе LDPC-коды и коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (BCH) относятся к классу линейных блочных кодов (N, K), где N — длина кодового слова, K — количество информационных бит, $R = K/N$ — скорость кода.

Структурно эти коды описываются двудольным графом Таннера $G = (V \cup C, E)$, где V — множество переменных узлов (соответствуют битам кода), C — множество проверочных узлов (соответствуют уравнениям четности), E — ребра, соединяющие узлы V и C [4].

Модель системы передачи использует BPSK (1 бит/символ) или QPSK (2 бита/символ) модуляцию, где для BPSK кодовое слово после модуляции $M = N$ (один символ на бит), для QPSK $M = N/2$ (два бита на символ).

Канал связи содержит аддитивный белый гауссовский шум (AWGN), где принятый сигнал по каналу $Y = X + N$, где $X \in \mathbb{C}^M$ — переданные модулированные символы, $N \sim \text{CN}(0, \sigma^2 I_M)$ — комплексный шум, $\sigma^2 = N_0/2$ — дисперсия шума, N_0 — спектральная плотность мощности шума, I_M — единичная матрица размерности $M \times M$.

Логарифмическое отношение правдоподобия для v -го бита вычисляется как:

$$L_v = \log \frac{P(y_v|b_v=0)}{P(y_v|b_v=1)} = \frac{2}{\sigma^2} \cdot \text{Re}y_v, \quad (1)$$

где y_v — принятый символ, соответствующий v -му биту;

$\text{Re}\{\cdot\}$ — действительная часть комплексного числа

Для QPSK расчет проводится отдельно для синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих.

Для BCH-кодов граф Таннера строится на основе порождающего многочлена $g(x)$, контрольных сумм в поле Галуа $\text{GF}(2^m)$. В LDPC-кодах матрица проверок четности H определяет структуру графа, используются итеративные алгоритмы распространения доверия.

Как и в классическом графе Таннера, предлагаемая GNN-архитектура включает два типа узлов: переменные узлы (VN, Variable Nodes) соответствуют столбцам проверочной матрицы H (кодovým битам), их количество соответствует $K = \dim(\text{Ker}(H))$ (для кода (N, K)), т.е. число информационных бит равно размерности пространства решений, факторные узлы (FN, Factor Nodes) соответствуют строкам H (проверочным уравнениям), их количество определяется $N-K$ (ранг матрицы H) [5, 6].

Обобщенная блок-схема алгоритма декодирования каналов на основе общей графовой нейронной сети приведена на рис. 1.

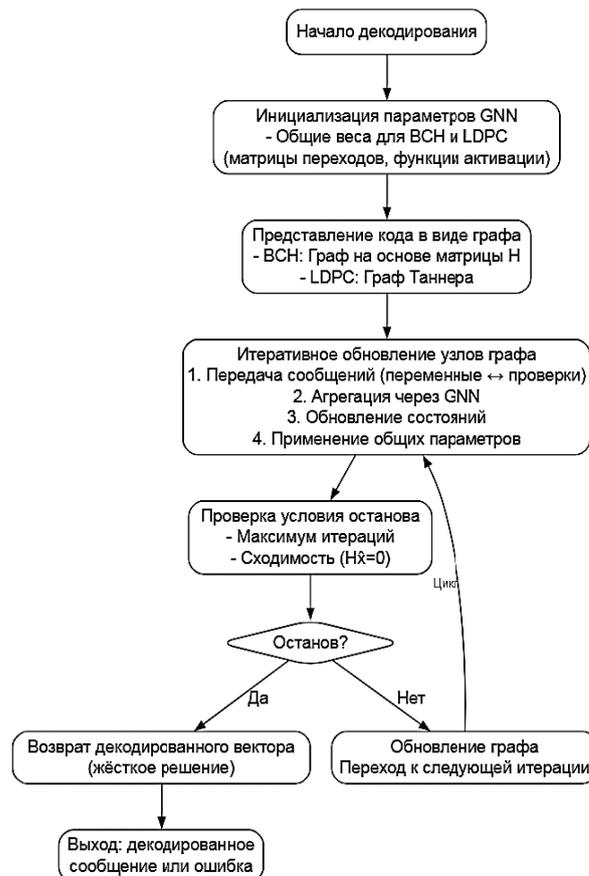


Рис. 1. Блок-схема алгоритма декодирования каналов на основе общей графовой нейронной сети

Графа $\mathcal{E} = \{(v_i, u_j)\}$ определяются ненулевыми элементами H , где каждое ребро $e \in \mathcal{E}$ является направленным ($VN \leftrightarrow FN$). Для LDPC граф разреженный (малая плотность единиц в H), для BCH граф содержит алгебраические зависимости.

Для реализации обучаемого декодера вводится следующая система параметров:

Состояния узлов:

- VN: $h_v^i \in R^{F_n}$ (F_n — размерность признакового пространства),
- FN: $h_u^i \in R^{F_n}$.

Атрибуты узлов:

- $g_v^i \in R^{F_a}$ (для VN) — кодируют значимость бита в кодовом слове
- $g_u^i \in R^{F_a}$ (для FN) — отражают строгость проверочного уравнения

Всего: $(2\mathcal{E}) \times F_a$ параметров, где F_a — размерность пространства атрибутов (гиперпараметр, обычно 8-32).

- индексы i, j — идентификаторы узлов.

Атрибуты узлов в GNN-декодере для LDPC/BCH кодов являются обучаемыми параметрами, которые наделяют каждый узел графа Таннера дополнительной семантической

информацией, позволяя нейросети адаптивно учитывать особенности структуры кода и условий канала [7].

На каждом слое GNN (итерации декодирования) выполняются:

- Фаза обновления сообщений

Для каждого ребра $(v,u) \in \mathcal{E}$ передача сообщения от VN к FN и от FN к VN (псевдокод на языке python):

```
for v, u in edges: # Параллельно для всех ребер
    # BPSK: LLR_v = 2*y_v/σ², QPSK: отдельно для I/Q
```

```
    m_vu[t] = MLP_v([h_v[t], h_u[t], g_vu, LLR_v])
```

```
    m_uv[t] = MLP_u([h_u[t], h_v[t], g_uv])
```

где MLP_v, MLP_u — многослойные перцептроны с активацией SiLU (нелинейная функция, используемая в нейронных сетях, которая сочетает свойства сигмоиды и линейного преобразования).

- Фаза агрегации (этап, на котором информация от соседних узлов графа Таннера

объединяется для обновления состояния каждого узла. Это ключевой механизм, позволяющий нейросетевому декодеру учитывать структуру кода и корректировать ошибки).

Для каждого узла (псевдокод на языке python):

```
for v in variable_nodes: # Параллельно для всех VN
    h_v[t+1] = GRU_v(h_v[t], aggregate(m_uv[t]
    for u in neighbors(v)))
```

```
for u in factor_nodes: # Параллельно для всех FN
    h_u[t+1] = GRU_u(h_u[t], aggregate(m_vu[t]
    for v in neighbors(u)))
```

Для наглядной иллюстрации принципов работы алгоритма декодирования канала, основанного на графовых нейронных сетях (GNN), рассмотрим конкретный пример. В качестве основы возьмем матрицу проверки четности H размерности $N=7, K=4$, представленную на рис. 2, а. Соответствующий этой матрице граф Таннера (рис. 2, б) содержит три узла проверки (FN — Function Nodes) и семь переменных узлов (VN — Variable Nodes) [8].

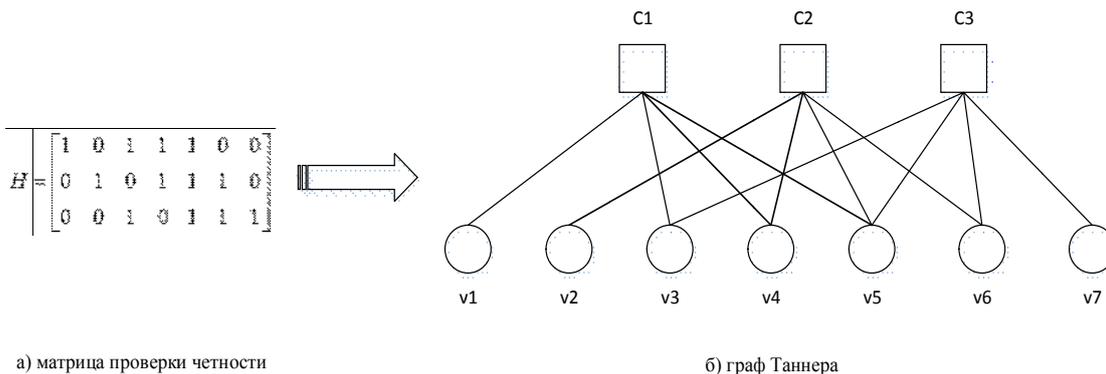


Рис. 2. Матрица четности (а) и соответствующий ей граф Таннера (б)

На рис. 3 представлена детальная схема преобразования графа Таннера в алгоритм де-

кодирования каналов, основанный на графовых нейронных сетях (GNN).

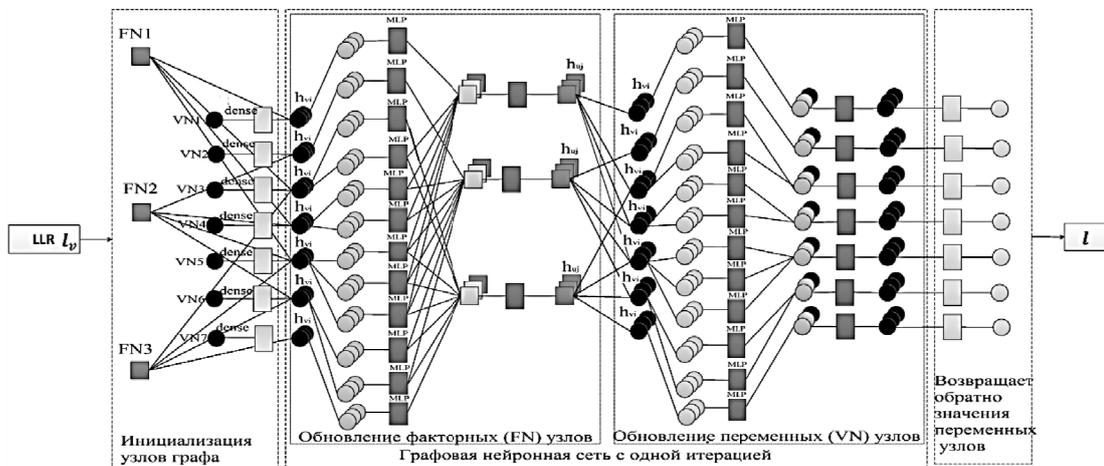


Рис. 3. Алгоритм декодирования канала на основе GNN для кода (7,4) с одной итерацией

Исходные данные после прохождения через модуляцию BPSK и канал с аддитивным белым гауссовым шумом (AWGN) преобразуются в логарифмические отношения правдоподобия (LLR). Размерность полученного LLR составляет $batchsize \times 7$, где $batchsize$ определяет количество обрабатываемых последовательностей в одном пакете.

Переменные узлы (VN) получают входные LLR-значения l_{v_i} (размерность: $batch_size \times 7$).

Dense слой, используя формулу (2), преобразует эти значения в скрытые представления h_{v_i} , которые будут использоваться для передачи сообщений между узлами.

$$h_{v_i} = l_{v_i} \cdot W + b, \quad (2)$$

где W — матрица весов плотного слоя (размерность: 7×20),

b — вектор смещения (опционально),

h_{v_i} — выход размерности $batch_size \times 20$ (если lv_i имеет размер $batch_size \times 7$).

Использование GNN позволяет эффективно учитывать структуру графа Таннера, обеспечивая передачу сообщений между узлами FN и VN на каждой итерации декодирования. Это способствует уточнению оценок переданных символов и повышению помехоустойчивости системы.

Оптимизация алгоритма декодирования на основе графовой нейронной сети

Стандартная реализация GNN-декодера требует значительных вычислительных ресурсов из-за большого количества параметров модели (атрибуты узлов и ребер), необходимости хранить отдельные веса для каждого направления передачи сообщений и множества независимых преобразований на каждой итерации.

Основные направления оптимизации:

- Упрощение структуры графа. Переход от направленных ребер к ненаправленным: каждое ребро теперь содержит единый атрибут вместо двух (для каждого направления), экономия памяти: 50 % сокращение для хранения атрибутов ребер.

- Совместное использование параметров преобразований. Вместо четырех независимых преобразований на итерации используем два метода.

Метод 1. Полное совместное использование, блок-схема которого показана на рис. 4. Содержит единый набор весов для всех этапов передачи сообщений. Все преобразования используют общую матрицу проекции. Максимальная экономия параметров (75 % сокращение). Подходит для простых кодов (BCH).

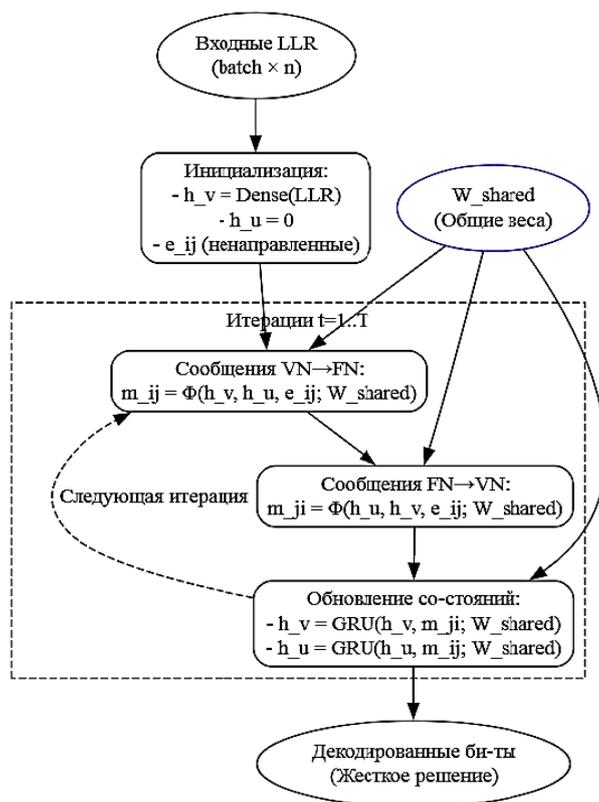


Рис. 4. Метод 1. Полное совместное использование параметров преобразования

Метод 2. Частичное совместное использование (показан на рис. 5). Включает разделение на две группы преобразований: VN→FN и FN→VN (общие веса), обновление узлов VN и

FN (отдельные веса). Особенности данного метода являются компромисс между эффективностью и качеством, экономия параметров ≈50 %, рекомендуется для LDPC-кодов.

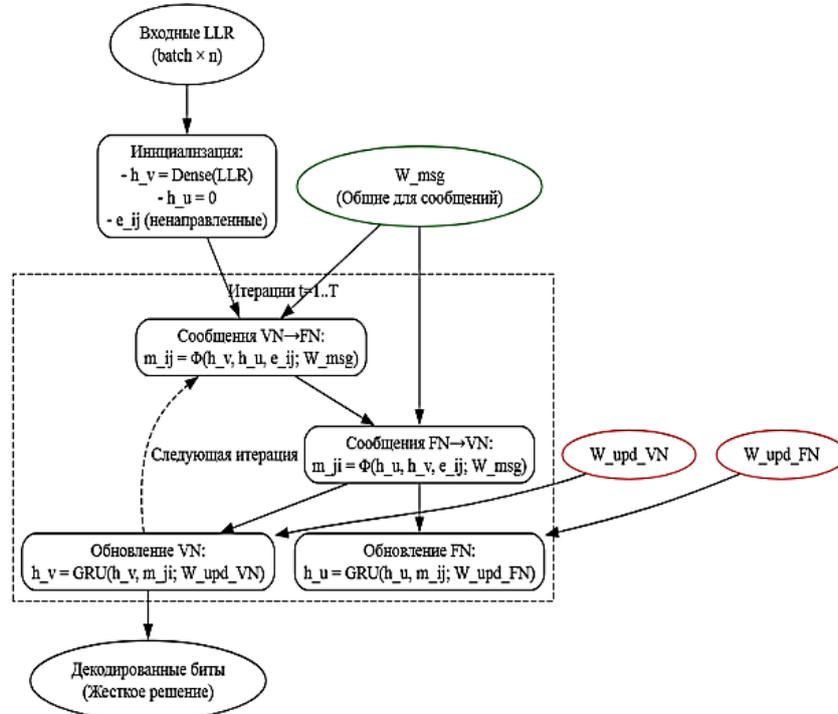


Рис. 5. Блок-схема частичного совместного использования

Результаты моделирования

Сначала выполним моделирование для BCH кода для метода 1, т.к. он подходит для простых BCH кодов. Данные для моделирования следующие: Код: BCH(63, 45) (простой код с алгебраической структурой). Размерность атрибутов: $d = 64$. Итерации декодера: $T = 5$. SNR диапазон от 1 до 5 дБ с шагом 0.5 дБ. Количество тестовых слов: 10^6 на точку SNR. Зависимости коэффициента битовых ошибок (BER) и отношения количества кадров, принятых с ошибками, к общему числу переданных (FER) от SNR приведены на рис. 6 и рис. 7 соответственно.

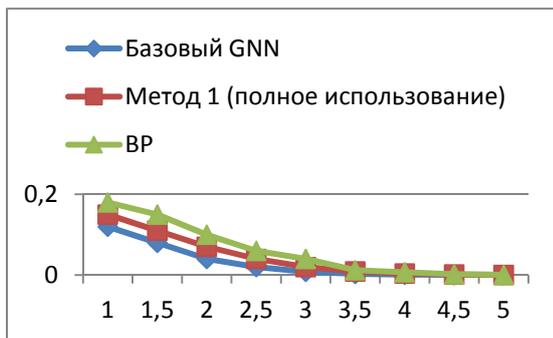


Рис. 6. Зависимость BER от SNR для BCH (63,45)

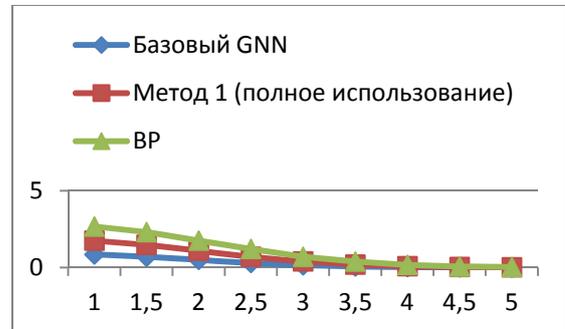


Рис. 7. Зависимость FER от SNR для BCH (63,45)

Из приведенных графиков видно, что GNN-декодеры превосходят BP на 15-50 % в среднем по SNR, метод 1 уступает базовому GNN на ~0.03–0.05 по BER/FER при низких SNR, но разница уменьшается с ростом SNR.

Базовый GNN обеспечивает улучшение FER на 16-80 % по сравнению с BP, оптимизированный GNN (Метод 1) сохраняет 50-75 % преимущества при экономии 75 % памяти. Наибольший выигрыш при высоких SNR (4-5 дБ).

Потребление памяти сокращается на 57 % (с 2.1 МВ до 0.9 МВ), а скорость декодирования увеличивается на ~25% благодаря уменьшению операций.

Второй метод с частичным совместным использованием параметров был промоделирован для LDPC (128, 64) кода с нерегулярным графом Таннера. Использовались размерность атрибутов $d = 64$, итерации декодера $T = 10$ (LDPC требует больше итераций). SNR диапазон от 0 до 4 дБ с шагом 0.5 дБ (LDPC чувствителен к низким SNR). Количество тестовых слов 10^6 на точку SNR.

Зависимости BER и FER от SNR приведены на рис. 6 и рис. 7 соответственно для кода LDPC (128, 64) показаны на рис. 8 и рис. 9 соответственно.

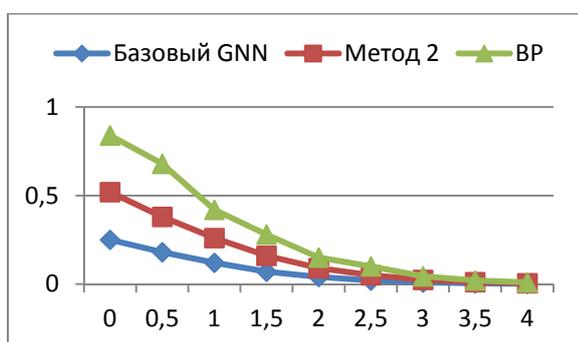


Рис. 8. Зависимость BER от SNR для LDPC (128, 64)

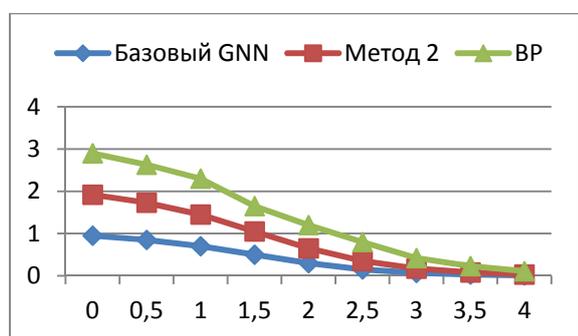


Рис. 9. Зависимость FER от SNR для LDPC (128, 64)

Из проведенного моделирования видно, что GNN-декодеры улучшают BER на 15-40 % против BP, метод 2 ухудшает BER/FER на ~10–15 % по сравнению с базовым GNN, но сохраняет приемлемую точность для практического использования. Улучшение FER достигает 36-87 % в пользу GNN-декодеров. Метод 2 сохраняет 60-75 % преимущества базового GNN. Наибольшая разница проявляется при $SNR > 2$ дБ.

В плане оптимизации ресурсов использование метода 2 позволит сокращение памяти на 20 % и ускорить декодирование на 17 %.

Для LDPC: Метод 2 предпочтительнее Метода 1, так как частичное разделение параметров лучше учитывает нерегулярность графа.

GNN декодеры стабильно превосходят BP на всем диапазоне SNR. Оптимизированные версии сохраняют значительную часть преимущества: метод 1 (BCH): 50-75 % от выигрыша базового GNN, метод 2 (LDPC): 60-85 % от выигрыша базового GNN.

Заключение

В данной статье проведено детальное исследование оптимизации GNN-декодеров для двух классов кодов — BCH(63,45) и LDPC (128,64). Основное внимание уделено сокращению вычислительных ресурсов при сохранении приемлемой точности декодирования. Результаты моделирования демонстрируют, что для кода BCH (63,45) GNN-декодеры превосходят алгоритм BP (Belief Propagation) на 17 %, причем наибольшее преимущество наблюдается в зоне высоких SNR (4–5 дБ).

В случае LDPC (128,64) преимущество достигает 36-87 %, особенно заметное при $SNR > 2$ дБ.

Полученные результаты подтверждают, что GNN-декодеры представляют собой перспективную альтернативу традиционным методам декодирования, сочетая высокую точность с возможностями аппаратной оптимизации. Предложенные методы адаптации параметров позволяют гибко настраивать декодеры под конкретные требования системы по производительности и ресурсоемкости.

Литература

1. Liang Y., Lam C., Ng B. Joint-Way. Compression for LDPC Neural Decoding Algorithm With Tensor-Ring Decomposition // IEEE Access 2023, 11, Pp. 22871–2287.
2. Хорошайлова М.В. Архитектура для стохастических LDPC-декодеров с использованием эффективной площади кристалла на основе ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 95-100.
3. Wang B., Li J., Zhang Y. Design and Analysis of LDPC Codes for Deep-Space Communications // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2021. Vol. 57. No. 3. Pp. 1234-1245.
4. Wang W., Liu X. Performance Analysis of LDPC Codes under Rayleigh Fading Channels // Proceedings of IEEE ICC. 2006. Pp. 1-5.
5. Blind Recognition of LDPC Codes Using Convolutional Neural Networks / L. Li [et al.] // Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 7–10 May 2021. Pp. 696–700.
6. Image segmentation using deep learning: a survey. / S. Minaee [et al.] // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2021. 44. Pp. 3523–3542.
7. Разработка QC-LDPC-декодера с высокой пропускной способностью для 5G беспроводной радиосвязи /

А. В. Башкиров [и др.] // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 7. С. 14-19.

8. Хорошайлова М. В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с

использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.

Поступила 23.06.2025; принята к публикации 14.08.2025

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538
Турецкий Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tav7@mail.ru

NEURAL NETWORK DECODING OF LDPC AND BCH CODES BASED ON TRAINABLE GRAPH ARCHITECTURES

M.V. Khoroshaylova, A.V. Turetskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper presents a fully differentiable graph neural network (GNN) architecture designed for decoding communication channels. The developed approach demonstrates decoding efficiency comparable to traditional methods for various classes of correction codes, including low-density parity-check code (LDPC) and Bose-Chowdhury-Hockingham (BCH) codes, while significantly reducing the required number of iterations. Each decoding iteration is represented as a layer of a graph neural network. The essence of the method is to replace deterministic message transmission operations in classical decoders with adaptive neural network blocks that independently identify optimal data processing rules in the code graph structure during the learning process. Unlike most existing deep learning-based solutions, the proposed architecture has advantages such as scalability for arbitrary-length codes and the absence of limitations related to dimension issues. Experimental results show a significant superiority of the proposed methodology for the BCH (63,45) code, an improvement has been achieved with maximum gain in the area of high SNRs (4-5 dB) compared with the weighted trust propagation algorithm (BP), and for LDPC(128, 64) codes of the 5G NR standard, the advantage reaches 36-87%, especially noticeable with SNR > 2 dB

Key words: graph neural networks, low-density parity-check code, Bose-Chowdhury-Hockingham code, trust propagation algorithm, scalability

Acknowledgements: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Youth Laboratory" no. FZGM-2024-0003

References

1. Liang Y., Lam C., Ng B. "Joint-way compression for LDPC neural decoding algorithm with tensor-ring decomposition", *IEEE Access*, 2023, no. 11, pp. 22871–22877.
2. Khoroshaylova M.V. "Architecture for stochastic LDPC decoders using an effective crystal area based on FPGAs", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 95-100.
3. Wang B., Li J., Zhang Y. "Design and analysis of LDPC codes for deep-space communications", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 1234-1245.
4. Wang W., Liu X. "Performance analysis of LDPC codes under Rayleigh fading channels", *Proceedings of IEEE ICC*, 2006, pp. 1-5.
5. Li L., Huang Z., Liu C., Zhou J., Zhang, Y. "Blind recognition of LDPC codes using convolutional neural networks", *Proc. of the 2021 IEEE 4th Int. Conf. on Electronics Technology (ICET)*, Chengdu, China, 7–10 May 2021, pp. 696–700.
6. Minaee S., Boykov Y., Porikli F., Plaza A., Kehtarnavaz N., Terzopoulos D. "Image segmentation using deep learning: A survey", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2021, no. 44, pp. 3523–3542.
7. Bashkirov A.V. et al. "Development of a high-bandwidth QC-LDPC decoder for 5G wireless radio communications", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2022, vol. 86, no. 7, pp. 14-19.
8. Khoroshaylova M.V. "FPGA-based channel coding architecture for a 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.

Submitted 23.06.2025; revised 14.08.2025

Information about the authors

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538
Andrey V. Turetskiy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: tav7@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА ПРИ ЛВЧМ-МОДУЛЯЦИИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, Р.С. Сухомлинов, Д.А. Пухов, Д.А. Кузнецов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается задача определения параметров модуляции ЛВЧМ-сигнала (линейно возрастающая частотная модуляция) в условиях пассивного радиоприёма. Обоснована важность и необходимость правильного определения коэффициента расширения спектра в задачах классификации передающих устройств и оценки помехоустойчивости канала связи. Проанализированы современные методы определения параметров модуляции, основанные на использовании нейросетевых архитектур и спектральных признаков. Отмечается их вычислительная сложность и требование к предварительному обучению. Предложен подход на основе метода корреляционного сопоставления спектрограмм принимаемого радиосигнала с заранее сформированными шаблонами, соответствующим различным значениям коэффициента расширения спектра. В качестве математического аппарата выбрана нормализованная кросс-корреляция. Описано подключение испытательного оборудования, включающего аппаратный LoRa-передатчик на базе модуля SX1276 и программно-определяемый приёмник HackRF One. Для математической обработки сигнала была использована среда имитационного моделирования GNU Radio. В ходе эксперимента были исследованы основные сочетания комбинаций величины полосы пропускания со значениями коэффициента расширения спектра и получены результаты, подтверждающие эффективность предложенного подхода. Установлено, что при помощи корреляционной обработки возможно корректно определить значение коэффициента расширения спектра, включая случаи с минимальными различиями между значениями

Ключевые слова: линейная частотная модуляция, LoRa, коэффициент расширения спектра, нормализованная кросс-корреляция, программно-определяемое радио

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

С широким распространением беспроводных технологий особую популярность получили стандарты связи с низким энергопотреблением, способные обеспечивать связь на дальние расстояния (LPWAN). На данный момент одной из наиболее известных и практически применимых LPWAN-технологий является Long Range (LoRa) [1]. LoRa представляет технологию передачи данных, в основе которой лежит линейно возрастающая частотная модуляция (ЛВЧМ) [2]. ЛВЧМ позволяет равномерно распределить сигнал по спектру так, что при воздействии электромагнитных помех теряется только часть передаваемого сигнала. За счет высокой помехоустойчивости LoRa позволяет передавать данные на расстояние до нескольких десятков километров без потерь. Благодаря данным преимуществам одним из основных направлений применения LoRa в последние годы стало построение каналов управления и обмена данными для беспилотных летательных

аппаратов (БПЛА). Использование БПЛА растет стремительными темпами и на данный момент не ограничивается только гражданскими целями. Большое число аппаратов применяется в деструктивных целях. В связи с этим возникает задача оперативного обнаружения и распознавания каналов управления с целью отличить гражданские БПЛА от потенциально опасных.

Существующие решения

Эффективный мониторинг радиочастотной обстановки требует не только фиксации факта наличия LoRa-сигнала, но и определения параметров модуляции. К основным параметрам модуляции LoRa относятся коэффициент расширения спектра (SF), полоса пропускания (BW) и скорость кодирования (CR) [3]. Эти параметры позволяют не только оценить потенциальную дальность и устойчивость канала связи к помехам, но и использовать их в качестве признаков для идентификации источника сигнала.

В работах [4-6] для определения параметров модуляции рассматривается применение современных нейросетевых архитектур, таких

как CNN, ResNet и Autoencoder. Несмотря на высокую точность такие методы требуют больших вычислительных мощностей и большого объема размеченных данных. Кроме того, они предполагают плотную интеграцию с процессом обучения, что ограничивает их применимость в автономных системах обнаружения.

Другой тип решений связан с анализом частотно-временной структуры сигнала на основе дискретных преобразований. В работе [7] предлагается алгоритм определения коэффициента расширения спектра методом дискретного вейвлет-преобразования (DWT), применённого к оцифрованному LoRa-сигналу. В результате выполнения эксперимента авторы показали высокую точность способа и определили значение SF даже в условиях помехового воздействия при SNR равном -10 дБм. Однако данный способ сильно чувствителен к частотным сдвигам и имеет высокую вычислительную сложность.

Постановка задачи

Одним из основных параметров, задающих структуру LoRa-сигнала и его радиотехнические характеристики, является SF. Этот параметр определяет длительность символа, объём кодируемых битов и устойчивость сигнала к помехам. При увеличении SF символ становится длиннее, в связи с чем возрастает помехоустойчивость и дальность действия, но снижается скорость передачи данных. В контексте задач, где необходимо определить принадлежность передатчика, коэффициент расширения спектра служит косвенным идентификатором назначения беспроводного канала.

Технология-LoRa подразумевает передачу сигнала без явного указания используемых параметров модуляции, то есть приёмник не может извлечь значение SF из заголовка или структуры пакета напрямую. Таким образом возникает задача определения параметров модуляции LoRa сигнала исключительно на основе анализа его формы и структуры без доступа к содержимому пакета.

Предлагаемый метод решения

Сигнал LoRa представляет собой линейно-частотно модулированную последовательность символов. Символы формируют характерную картину в частотно-временной области, отображаемой в виде спектрограммы. На практике спектрограмма строится как двумер-

ное распределение мощности сигнала во времени и частоте. Каждое значение SF создает определенный наклон спектральной линии. Чем выше SF, тем медленнее изменение частоты и сильнее визуальный угол наклона линии (рис. 1). Такое свойство сигнала может быть использовано при манипуляциях связанных со структурным сравнением сигнала.

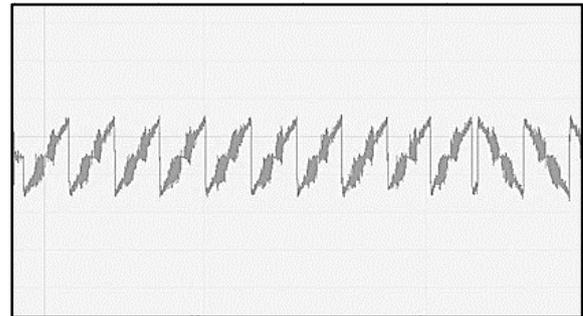


Рис. 1. Типовой сигнал LoRa

В настоящей работе предлагается метод определения коэффициента расширения спектра на основе корреляционного сопоставления фрагмента спектрограммы анализируемого сигнала из радиоэфира с набором заранее подготовленных шаблонов. Каждый из шаблонов генерируется отдельно и соответствует определённому значению SF. Полученные спектрограммы анализируемого радиосигнала с заданным шагом по временной оси сравниваются с шаблонами. На каждом шаге производится поэлементное сравнение всплесков мощности.

Для решения поставленной задачи была выбрана нормализованная кросс-корреляция (NCC). Уравнение корреляции представлено ниже в формуле (1):

$$\text{Corr}_i(\tau) = \sum_{f,t} \frac{(X(f, t + \tau) - \bar{X})(S_i(f, t) - \bar{S}_i)}{\sigma_X \cdot \sigma_{S_i}}, (1)$$

где спектрограмма сигнала $X(f, t)$ сопоставляется с шаблоном $S_i(f, t)$, соответствующим $SF = i$, \bar{X} и \bar{S}_i — средние значения по времени, τ — временной сдвиг на котором сигнал наиболее похож на шаблон, а $\sigma_X \cdot \sigma_{S_i}$ — стандартные отклонения, рассчитываемые по формулам дисперсии, примененной к каждому сигналу. Для исследуемого сигнала X отклонение рассчитывается по формуле (2)

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}, \quad (2)$$

где X_i — число отсчетов сигнала, \bar{X} — его среднее значение, а N — общее число отсчетов сигнала. Для шаблона S_i отклонение рассчитывается по формуле (3)

$$\sigma_{S_i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S}_i)^2}, \quad (3)$$

где S_i — число отсчетов сигнала, \bar{S}_i — его среднее значение, а N — общее число отсчетов сигнала соответственно.

Поиск максимального значения корреляции для каждого шаблона позволяет определить, насколько точно текущий участок сигнала соответствует данному SF. Максимальное значение корреляции выглядит как:

$$C_i = \max_{\tau} \text{Corr}_i(\tau), \quad (4)$$

а значение SF, при котором эта корреляция максимальна:

$$\widehat{SF} = \arg \max_i C_i. \quad (5)$$

Таким образом, весь процесс сводится к пошаблонному сравнению частотно-временных структур сигнала, представленных в виде матриц мощностей. Данный подход не требует знания структуры и содержимого передаваемого пакета.

Экспериментальное исследование и полученные результаты

Для экспериментального исследования предложенного подхода на основе корреляционного сопоставления спектрограмм было осуществлено подключение испытательного оборудования согласно структурной схеме, представленной на рис. 2. Практическая реализация представлена на рис. 3.

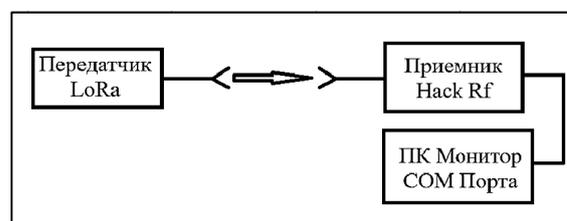


Рис. 2. Структурная схема взаимодействия испытательного оборудования



Рис. 3. Испытательное оборудование

Передающая часть станда построена на базе аппаратного модуля SX1276, сопряжённого с микроконтроллером ESP32 Dev Module. Используемый модуль передатчика поддерживает шесть коэффициентов расширения спектра SF от 7 до 12. Полоса пропускания может варьироваться в пределах от 125 кГц до 500 кГц, а скорость кодирования от 4/5 до 4/8. В качестве антенн использовались излучатели

типа Мохон с усилением 5.5 дБи, обеспечивающие стабильные параметры распространения в выбранной частотной полосе [8]. Приём сигнала осуществлялся программно-определяемым радио HackRF One, подключённым к персональному компьютеру.

Программно-управляющая часть была разделена на два уровня. Для формирования эталонных шаблонов LoRa-символов, соответ-

ствующих различным значениям коэффициента расширения спектра, использовалась среда имитационного моделирования GNU Radio [9]. Разработанная имитационная модель для создания шаблонов (рис. 4) позволяла генерировать сигналы LoRa с заданными параметрами модуляции и сохранять результат в виде потока данных, представляющих передаваемый сигнал во временной области.

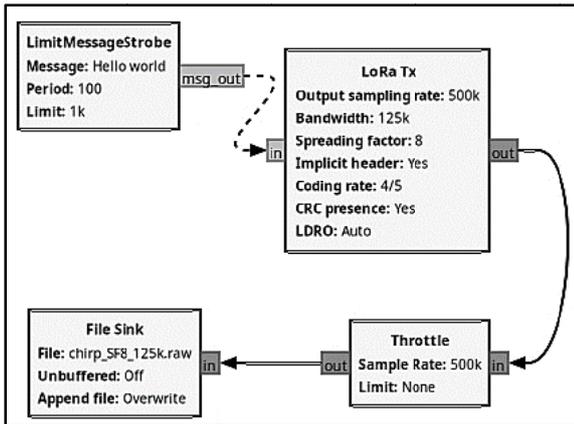


Рис. 4. Имитационная модель для создания шаблонов

На каждом этапе генерации сигнала SF варьировался в пределах диапазона от 7 до 12, для каждого значения ширины полосы пропускания. Полученные сигналы были сохранены в бинарном формате с целью последующего анализа. Однако для получения более информативного представления о структуре LoRa-символов потребовалась дополнительная обработка сигнала в квадратурной форме.

С этой целью был разработан вспомогательный Python-скрипт, реализующий процедуру квадратурной демодуляции (IQ-декодирования) с последующим преобразованием сигнала в комплексное представление. На выходе формировалась последовательность значений, содержащих амплитудные и фазовые компоненты сигнала, что позволило перейти от амплитудно-временного представления к фазо-частотному. Комплексная форма сигнала в виде $x(t) = I(t) + jQ(t)$ использовалась для построения спектрограмм и анализа параметров линейно возрастающей частотной модуляции (ЛВЧМ), лежащей в основе LoRa.

На спектрограммах, полученных после обработки, отчетливо фиксируется различие в наклоне ЛВЧМ-символа при разных значениях SF (рис. 5). Так для SF=12 наблюдается меньшая крутизна частотного изменения, что соответствует увеличенной длительности символа

и более низкой скорости передачи. При SF=7 скорость нарастания символа значительно выше, что указывает на меньшую длительность символа и более высокую скорость передачи.

Из рис. 5 можно сделать вывод о том, что полученные данные являются верными, поскольку они соответствуют аналитическому выражению длительности символа (6).

$$T_s = \frac{2^{SF}}{B}, \quad (6)$$

где T_s — длительность символа, а B — ширина полосы пропускания.

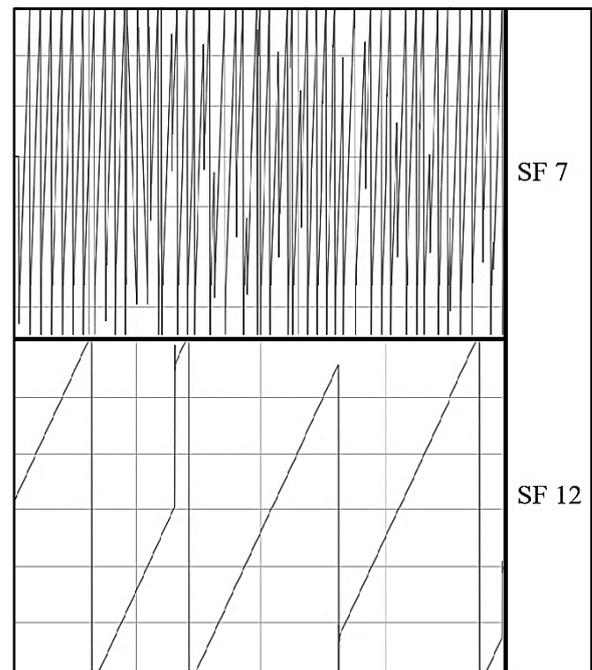


Рис. 5. Различие времени нарастания LoRa символа при разных SF

Для практической реализации процедуры автоматического определения коэффициента расширения спектра LoRa-сигнала на основе метода корреляционного сопоставления использовался Python-скрипт, позволяющий записать сигнал, произвести его квадратурную демодуляцию и сравнить с заранее заготовленными шаблонами сигналов различных SF.

На первом этапе производится приём и сохранение фрагмента анализируемого радиосигнала на необходимой несущей частоте. Далее осуществляется квадратурная демодуляция полученного сигнала, в результате которой формируется его комплексное представление. В таком виде сигнал используется в качестве входных данных для процедуры анализа.

Основной этап заключается в сравнении полученной матрицы мощности сигнала с заранее подготовленными эталонными шаблонами LoRa-символов, соответствующих различным значениям коэффициента SF. Сравнение реализуется с помощью, нормализованной кросс-корреляции, позволяющей выявить степень совпадения между текущим сигналом и каждым из шаблонов.

В ходе эксперимента передача данных осуществлялась на фиксированной частоте 915 МГц, при этом ширина полосы пропускания последовательно принимала значения 125, 250 и 500 кГц, а скорость кодирования оставалась постоянной и составляла 4/8. Для каждого значения полосы пропускания коэффициент расширения спектра варьировался от 7 до 12. Радиосигнал фиксировался приёмником HackRF One, а затем подвергался квадратурной демодуляции и преобразовывался в комплексное представление при помощи python скрипта на компьютере. Далее полученные данные обрабатывались методом корреляционного сопоставления с предварительно сформированными шаблонами LoRa-символов и представлялись в виде списка коэффициентов корреляции в лог (рис. 6).

```
chirp_SF9_125k.raw: 0.00307548
chirp_SF8_125k.raw: 0.00419788
chirp_SF12_125k.raw: 0.00284576
chirp_SF7_125k.raw: 0.00505269
chirp_SF10_125k.raw: 0.00322027
chirp_SF11_125k.raw: 0.00306417
✓ Лучшее совпадение: chirp_SF7_125k.raw (score=0.00505269)
```

Рис. 6. Результат сравнения исследуемого сигнала и шаблона

Анализ результатов и выводы

В табл. 1 представлены полученные численные результаты корреляции для анализируемого радиосигнала с заранее установленными значениями SF=7 и BW=125 кГц. По полученным значениям видно, что наибольшее расчетное значение корреляции соответствует шаблону с SF=7, что соответствует физическому радиосигналу.

Таблица 1
Результаты эксперимента для SF=7 и BW=125 кГц

SF шаблона	Значение корреляции
7	0.00505269
8	0.00419788
10	0.00322027
9	0.00307548
11	0.00306417
12	0.00284576

Аналогичные результаты были получены и для остальных комбинаций полосы пропускания и коэффициента расширения спектра. На рис. 7-9 представлены графики, отображающие корреляцию сигнала с различными SF.

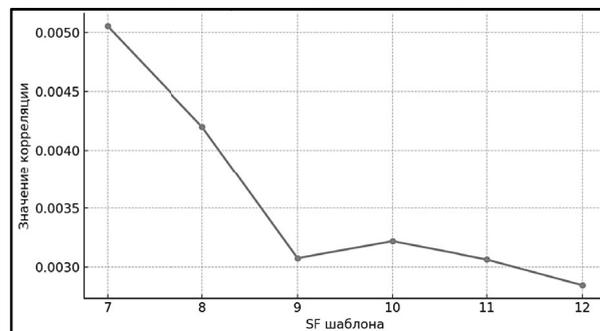


Рис. 7. График корреляции для сигнала с SF=7

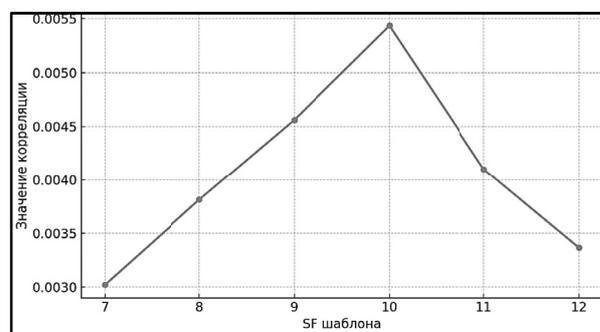


Рис. 8. График корреляции для сигнала с SF=10

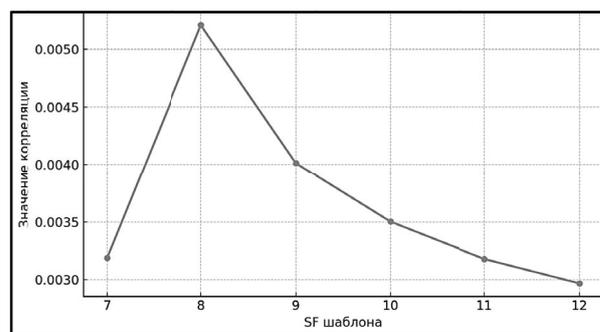


Рис. 9. График корреляции для сигнала с SF=8

Результаты эксперимента показали, что предложенный метод корреляционного сопоставления спектрограмм позволяет точно определять коэффициент расширения спектра LoRa-сигнала. Во всех протестированных конфигурациях максимум значения корреляции фиксировался при совпадении шаблона SF с реальным значением исследуемого радиосигнала, что подтверждает работоспособность предложенного подхода.

Заключение

В ходе работы был предложен и экспериментально проверен подход определения коэффициента расширения спектра LoRa на основе метод корреляционного сопоставления. Полученные экспериментальные результаты подтверждают работоспособность предложенного подхода. При проведении экспериментального исследования в большинстве случаев максимальное значение корреляции наблюдалось именно при совпадении шаблона SF с реальным значением, использованным при передаче.

В отличии от способов с применением машинного обучения предложенный подход не нуждается в предварительном обучении или сложной предварительной обработке.

В дальнейших исследованиях планируется разработка и испытание полнофункционального устройства предназначенного для анализа радиочастотной обстановки, автоматического обнаружения LoRa-сигналов и определения их параметров модуляции. Предполагается, что такая система будет использоваться для обнаружения и распознавания каналов управления несанкционированных БПЛА с последующим применением полученных данных для реализации направленного активного подавления.

Литература

1. Lora-alliance. URL: <https://loraalliance.org/> (дата обращения: 04.06.2025).
2. Степанов Н.В. Систематизированный обзор особенностей реализации физического уровня протокола LORA // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 11. С. 11–26.
3. Исследование влияния параметров LoRa-модуляции на помехоустойчивость канала связи / М.А. Ромашенко [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 1. С. 73–80.
4. A Comprehensive Survey on Deep Learning-Based LoRa Radio Frequency Fingerprinting Identification / A. Ahmed, B. Quoitin, A. Gros, V. Moeyaert // Sensors (Basel). 2024. Jul 8. 24(13). Pp. 4411.
5. Hybrid Chirp Signal Design for Improved Long-Range (LoRa) Communications / M. Noor-A-Rahim [et al.] // Signals. 2022. 3(1). Pp. 1–10.
6. Physical layer identification of LoRa devices using constellation trace figure / Y. Jiang [et al.] // J Wireless Com Network 2019, 223 (2019). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1542-x> (дата обращения 04.06.2025).
7. Koch D.J., Shahid M.O., Krishnaswamy B. Spreading Factor Detection for Low-Cost Adaptive Data Rate in LoRaWAN Gateways // Proceedings of the 20th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '22). Association for Computing Machinery, New York. USA. 2023. Pp. 918–924.
8. GNU Radio. URL: <https://www.gnuradio.org/>, свободный (дата обращения: 04.06.2025).
9. Active broadband antenna up to 6GHz. URL: <https://www.batronix.com/> свободный (дата обращения: 04.06.2025).

Поступила 17.06.2025; принята к публикации 04.08.2025

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Васильченко Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, старший преподаватель, младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Shadow951@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>

Сухомлинов Роман Сергеевич – лаборант-исследователь, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: sukhomlinov03@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6852-1067>

Пухов Дмитрий Анатольевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

Кузнецов Дмитрий Александрович – лаборант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: dima_kuznetsov_04@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7285-5016>

SPREADING FACTOR ESTIMATION IN LINEAR FREQUENCY MODULATION USING CORRELATION PROCESSING

M.A. Romashchenko, D.V. Vasil'chenko, R.S. Sukhomlinov, D.A. Pukhov, D.A. Kuznetsov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the study addresses the problem of determining the modulation parameters of a linear frequency modulated (LFM) signal in passive radio reception conditions. We justified the importance of accurately identifying the spreading factor, particularly in tasks involving the classification of transmitting devices and the assessment of signal robustness against interference. We analyzed current methods for determining modulation parameters, based on neural network architectures and spectral

features. We noted these methods for their computational complexity and reliance on prior training. We propose a novel approach based on correlating the spectrograms of received radio signals with pre-generated templates corresponding to different values of the spreading factor. We selected normalized cross-correlation as the mathematical tool for this purpose. The experimental setup includes a hardware LoRa transmitter based on the SX1276 module and a software-defined receiver HackRF One. We carried out signal processing using the GNU Radio simulation environment. Experimental results confirm the effectiveness of the proposed method. We show that correlation-based processing allows for accurate determination of the spreading factor, even in cases where the differences between values are minimal

Key words: linear frequency modulation, LoRa, spreading factor, normalized cross-correlation, software-defined radio

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. Lora alliance, available at: <https://loraalliance.org/> (date of access: 4.06.2025).
2. Stepanov N.V. "A systematic review of the features of the implementation of the physical layer of the LoRa protocol", *T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2023, vol. 17, no. 11, pp. 11–26.
3. Romashchenko M.A. et al. "Study of the impact of LoRa modulation parameters on communication channel noise immunity", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 1, pp. 73–80.
4. Ahmed A., Quoitin B., Gros A., Moeyaert V. "A comprehensive survey on Deep Learning-Based LoRa radio frequency fingerprinting identification", *Sensors (Basel)*, 2024, vol. 24, no. 13, article 4411.
5. Noor-A-Rahim M., Khyam M.O., Mahmud A., Li X., Pesch D., Poor H.V. "Hybrid chirp signal design for improved Long-Range (LoRa) communications", *Signals*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 1–10.
6. Jiang Y., Peng L., Hu A. et al. "Physical layer identification of LoRa devices using constellation trace figure", *Journal of Wireless Communications and Networking*, 2019, article 223.
7. Koch D. J., Shahid M.O., Krishnaswamy B. "Spreading factor detection for low-cost adaptive data rate in LoRaWAN gateways", *Proc. of the 20th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '22)*, ACM, New York, 2023, pp. 918–924.
8. GNU Radio, available at: <https://www.gnuradio.org/> (date of access: 4.06.2025).
9. Active broadband antenna up to 6GHz, available at: <https://www.batronix.com/> (date of access: 4.06.2025).

Submitted 17.06.2025; revised 04.08.2025

Information about the authors

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Dmitriy V. Vasil'chenko, Cand. Sc. (Technical), Senior lecturer, Junior Researcher, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Shadow951@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>

Roman S. Sukhomlinov, laboratory researcher, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sukhomlinov03@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6852-1067>

Dmitriy A. Pukhov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

Dmitriy A. Kuznetsov, laboratory assistant, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dima_kuznetsov_04@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7285-5016>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЙЯНИЯ ПРОСТЫХ ОБЪЕМНЫХ ТЕЛ ПРИ ПОМОЩИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Т.С. Багунц¹, А.В. Володько¹, Е.А. Ищенко¹, Р.В. Кузьменко^{2,1}, Д.К. Проскурин¹,
А.В. Рябкин¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия

Аннотация: проведено исследование картин диаграмм обратного рассеяния. В качестве объектов исследования использовались разные простые тела: шар, куб, цилиндр, конус, пирамида и пирамида, внутри которой выполнен угловой отражатель. Данные фигуры были выполнены с использованием аддитивных технологий. При помощи лабораторной установки, в которой используется локатор, рабочий диапазон частот которого находится в ультразвуковой области, было проведено измерение диаграмм. Полученные в ходе лабораторного исследования результаты сравнивались с результатами, полученными при помощи электродинамического моделирования. В качестве среды моделирования использовалась программа DS CST Studio Suite 2025. Высокая эффективность и точность предложенного метода, полученные в результате исследования, были продемонстрированы путём отображения результатов моделирования на одной плоскости в относительных единицах измерения. Это даёт возможность для студентов технических направлений в процессе проведения лабораторных занятий понять принципы построения диаграмм обратного рассеяния для простых фигур. Данный метод позволяет существенно снизить стоимость установки и, следовательно, повысить доступность для учебного процесса, поскольку при выполнении лабораторного исследования не требуются дорогостоящее оборудование и макеты

Ключевые слова: диаграмма обратного рассеяния, радиолокация, лабораторная установка, аддитивные технологии

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» (проект № FZGM-2024-0003)

Введение

Одной из актуальных задач при подготовке специалистов по таким современным специальностям, как радиоэлектронные системы и комплексы, радиопизика, радиотехника, является измерение диаграммы обратного рассеяния объектов. Поскольку исследование отраженных волн от объектов требует оборудования с высокой стоимостью, то данный фактор препятствует проведению исследований. Следовательно, вытекает ещё одна актуальная задача по созданию лабораторного стенда малой стоимости, показывающая все качественные показатели отражения волн от объектов с приемлемой для обучения точностью и достоверностью.

Для измерения диаграмм обратного рассеяния (ДОР) с последующим вычислением эффективной площади рассеяния (ЭПР) требуется наличие как безэховой камеры, так и дорогостоящего оборудования, представленных в виде анализаторов сигналов, генераторов, векторных анализаторов цепей [1-2]. Этот факт затрудняет распространение практики измере-

ния на большинство образовательных учреждений. Дополнительная сложность представлена в виде измерения ЭПР на основе ДОР, требующего калибровочного шара [3], обладающего одним уровнем рассеяния по всей окружности пространства.

Исследования и тестовые измерения характеристик следует начать с простых тел [4-6]. Это позволяет добиться повторяемости результатов, что даёт возможность продемонстрировать базовые принципы радиолокации и измерения объектов. В данной работе предлагается лабораторная установка для измерения характеристик ДОР и их корреляция с результатами моделирования в DS CST Studio 2025. В качестве метода удешевления стенда и его реализации была предложена методика измерения ДОР при помощи ультразвукового стенда, предназначенного для определения характеристик объектов, как это было показано в работе [7].

В данной работе было проведено исследование ДОР для различных простых тел с последующим сравнением результатов с результатами, полученными в ходе электродинамического моделирования, выполненного с помощью персонального компьютера.

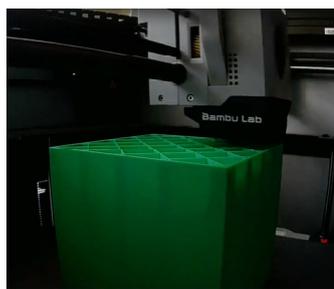
Описание процесса эксперимента и используемых моделей

В основу лабораторного стенда положен метод ультразвукового измерения характеристик диаграмм обратного рассеяния [7], обладающий следующими достоинствами:

1) требуется осциллограф с малым частотным диапазоном, а не анализатор сигналов или спектроанализатор совместно с генератором сверхвысоких частот (СВЧ), что позволяет уменьшить стоимость оборудования;

2) ультразвук частой 40 кГц умеет способность уменьшить побочное излучение и зависимость от переотражения, что особенно важно в условиях учебной лаборатории;

3) данный метод позволяет использовать модели из пластика, которые не требуют металлизации, что позволило воспользоваться аддитивными технологиями (3D-печатью) (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Изготовление макетов для измерений: а) процесс печати куба; б) вид макетов для измерения

Исследования макетов простых тел проводились с последующим сравнением результатов с компьютерным моделированием в программе DS CST Studio Suite 2025 методом конечных элементов. Вычисления выполнялись на вычислительной системе с процессором Intel Core Ultra 9 285k и видеокартой RTX4090, при этом длительность одного моделирования не превышала 15 минут с угловым сканированием от 0 до 180 градусов при шаге 5 градусов. В то же время проводились измерения на лабораторном стенде (рис. 2).



Рис. 2. Лабораторный стенд для измерения ДОР

Исследование было проведено на лабораторном стенде, размещенном в коридоре. Это позволило создать оптимальные условия для проведения измерений, максимально защищенных от побочных движений и других воздействий. При эксперименте были облучены объекты ультразвуковыми волнами, после чего был приём отражённого сигнала. Эксперимент проводился при повороте в диапазоне от 0° до 180° с шагом в 5° относительно излучателя в моноэлектрическом режиме.

Лабораторный стенд состоял из следующего оборудования:

1. исследуемые фигуры;
2. генератор ультразвуковых волн;
3. цифровой осциллограф.

Первой фигурой исследовалась сфера. Данная фигура с точки зрения ДОР простая, однако она является одной из наиболее сложной по изготовлению методом FFF/FDM печати. Она была изготовлена путём печати двух полушаров с динамическим слоем от 0.35 до 0.08 мм, что позволило добиться максимального сглаживания формы сферы. Вид характеристик ДОР сферы был получен в результате исследований на стенде (материалом изготовления фигур является полилактид (PLA)), а в электродинамическом моделировании использовался идеальный проводник (PEC). Результаты измерений и моделирования наносились на один график и представлены на рис. 3. Для компенсации разности шкал, так как пересчет в значения ЭПР не выполнялся, а интерес вызывала именно форма ДОР, результаты были нормированы друг относительно друга.

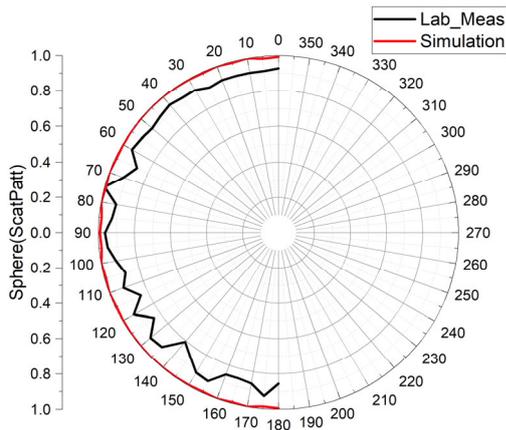


Рис. 3. Картина ДОР для сферы

Из полученного графика следует, что вышеописанный метод позволяет с высокой точностью получить картины ДОР, однако из-за наличия переотражений и колебаний модели в процессе измерения проявляются искажения. Однако эти изменения малы, что позволяет сделать общие выводы о картинах ДОР простого тела. Этот факт является очень важным, поскольку позволяет понимать процесс получения картин ДОР в образовательном процессе. На рис. 4 приводится вид результатов для куба.

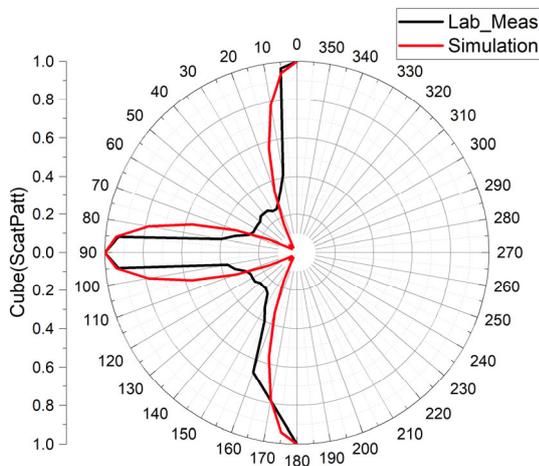


Рис. 4. Картина ДОР для куба

Для случая с кубом на картине ДОР хорошо видны пики, полученные в результате отражений от плоских граней в диапазоне измерений 0-180 градусов. Следовательно, использование предложенной лабораторной установки даёт возможность для правильного анализа характеристик картин ДОР.

Рассмотрим более сложные тела вращения. Характеристики для цилиндра, вращение которого производилось в горизонтальной плоскости, представлены на рис. 5. При измерении

ДОР данная плоскость была выбрана ввиду наличия большого интереса пересечением боковой грани, а также двух оснований.

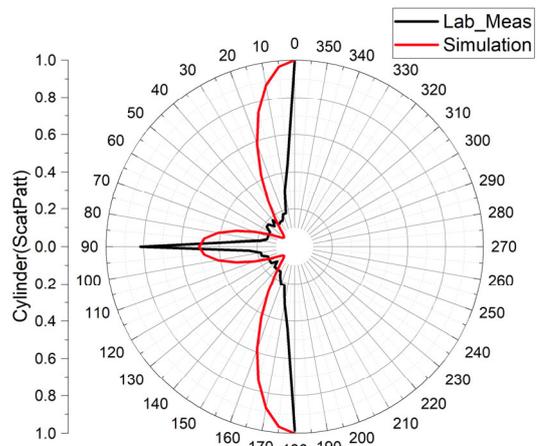


Рис. 5. Картина ДОР для цилиндра

На данном рисунке отчётливо видно 3 пика, которые практически повторяют результаты моделирования. Также стоит отметить всплески на боковых гранях, вызванные большей длиной волны при проведении лабораторного исследования. Результаты для конуса, у которого в качестве точки начала отсчёта было принято плоское основание конуса, а углу в 180 градусов соответствовало остриё, приведены на рис. 6.

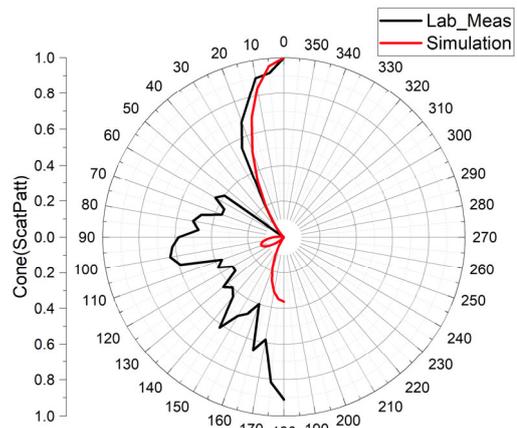


Рис. 6. Картина ДОР для конуса

Данная картина позволяет оценить изменение уровня ЭПР при повороте конического тела. Результаты исследования имеют высокий интерес, поскольку уровни отражённого сигнала демонстрируют особенность роста ЭПР при падении волн на конические основания двигателей самолётов. В связи с тем, что при использовании 3D-печати не предоставляется возможность в получении идеального острого оконча-

ния фигуры, наблюдается рост отражённого сигнала.

На рис. 7 показаны результаты исследования для пирамиды и пирамиды с сформированным внутри угловым отражателем. Данные результаты показывают нам высокую эффективность предложенного метода измерения характеристик в лабораторных исследованиях.

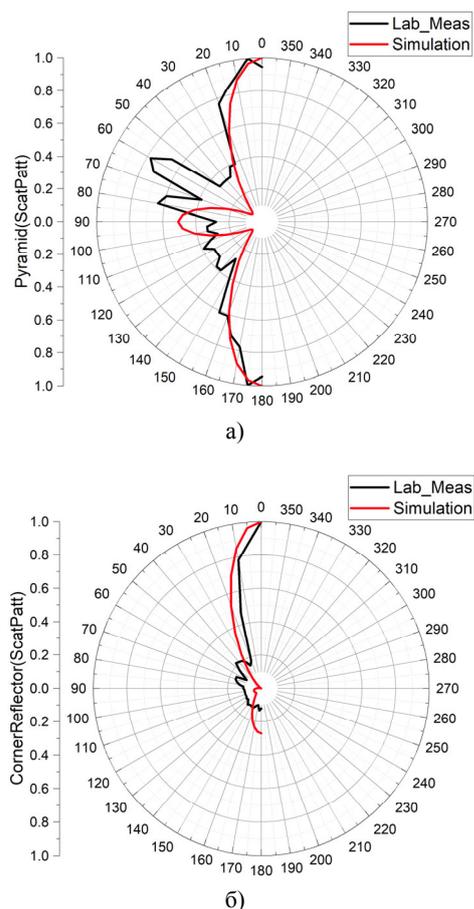


Рис. 7. Картина ДОР: а) пирамида; б) угловый отражатель

Заключение

Проведенное в данной работе исследование показывает, что применение лабораторной

установки измерения картин диаграмм обратного рассеяния позволяет обеспечить понимание и оценку основных принципов формирования ЭПР и роста радиолокационной заметности объектов. Применение ультразвуковых волн позволило обеспечить удешевление установки, при этом снизить зависимость от внешних факторов, однако понизило разрешающую способность, что отчетливо видно по картинам диаграмм обратного рассеяния. Стоит отметить, что увеличение точности измерений можно достичь путём дополнительной стабилизации объектов при повороте установки ввиду наличия колебаний.

Литература

1. Knott E.F. A progression of high-frequency RCS prediction techniques. // Proceedings of the IEEE, 1985, Vol. 73, No. 2. Pp. 252-264.
2. Method based on physical optics for the computation of the radar cross section including diffraction and double effects of metallic and absorbing bodies modeled with parametric surfaces / F.S. de Adana, I.G. Diego, O.G. Blanco, P. Lozano, M.F. Catedra // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004. Vol. 52. No. 12. Pp. 3295-3303.
3. Qian Z., Dong W., Yongwei Z. A method of RCS measurement in the outfield. // 2020 3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM), 2020. Pp. 91-94.
4. Performance analysis of Radar Cross Section for simpler bodies coated with lossy materials / A. Yuvaraj, R. Biradar, S. Manvi, D.D. Geeta // 3rd International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom 2011). 2011. Pp. 265-268.
5. Manmohan C.T., Singh H. Analytical estimation of radar cross section of infinitely long conducting cylinder coated with dielectric material // 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics. 2016. Pp. 402-406.
6. Ünal İ., Gulum T.O., Bayramoğlu E.Ç. Investigations of electrical size effects on radar cross section for orthogonally distorted corner reflectors // 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon), 2015. Pp. 1515-1519.
7. Майзельс Е.Н., Торгованов В.А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. М.: Советское радио, 1972. 232 с.

Поступила 28.05.2025; принята к публикации 30.06.2025

Информация об авторах

Багунц Тигран Сейранович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: stuydent20@inbox.ru

Володько Александр Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: zavlabvgtu@mail.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Кузьменко Роман Валентинович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математики и естественно-научных дисциплин Воронежского института ФСИН России (394072, Россия, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1А, корп. 1); профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: roman_kuzmenko@inbox.ru

Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rector@cchgeu.ru

Рябкин Алексей Владимирович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: riabikinalexei@yandex.ru

LABORATORY SETUP FOR DETERMINING BACKSCATTERING DIAGRAMS OF VOLUMETRIC BODIES IN THE NEAR ZONE

T.S. Bagunts¹, A.V. Volod'ko¹, E.A. Ishchenko¹, R.V. Kuz'menko^{2,1}, D.K. Proskurin¹, A.V. Ryabikin¹

¹**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

²**Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation**

Abstract: we conducted a study of backscattering diagrams. We used various simple bodies as objects of study: a sphere, a cube, a cylinder, a cone, a pyramid, and a pyramid with a corner reflector inside. These figures were made using additive technologies. Using a laboratory setup that uses a locator whose operating frequency range is in the ultrasonic region, we measured the diagrams. We compared the results obtained during the laboratory study with the results obtained using electrodynamic modeling. We used DS CST Studio Suite 2025 as the modeling environment. We demonstrated high efficiency and accuracy of the proposed method obtained as a result of the study by displaying the modeling results on one plane in relative units of measurement. This enables students of technical fields to understand the principles of constructing backscattering diagrams for simple figures during laboratory classes. This method allows one to significantly reduce the cost of the setup and, consequently, increase its availability for the educational process, since expensive equipment and models are not required when performing a laboratory study

Key words: backscatter diagram, radar, laboratory setup, additive technologies

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Youth Laboratory" (project no. FZGM-2024-0003)

References

1. Knott E.F. "A progression of high-frequency RCS prediction techniques", *Proceedings of the IEEE*, 1985, vol. 73, no. 2, pp. 252-264.
1. De Adana F.S., Diego I.G., Blanco O.G., Lozano P., Catedra M.F. "Method based on physical optics for the computation of the radar cross section including diffraction and double effects of metallic and absorbing bodies modeled with parametric surfaces", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, vol. 52, no. 12, pp. 3295-3303.
2. Qian Z., Dong W., Yongwei Z. "A method of RCS measurement in the outfield", *2020 3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, 2020, pp. 91-94.
3. Yuvaraj A., Biradar R., Manvi S., Geeta D.D. "Performance analysis of Radar Cross Section for simpler bodies coated with lossy materials", *3rd International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom 2011)*, 2011, pp. 265-268.
4. Manmohan C.T., Singh H. "Analytical estimation of radar cross section of infinitely long conducting cylinder coated with dielectric material", *2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics*, 2016, pp. 402-406.
5. Ünal İ., Gulum T.O., Bayramoğlu E.Ç. "Investigations of electrical size effects on radar cross section for orthogonally distorted corner reflectors", *2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)*, 2015, pp. 1515-1519.
6. Mazels E.N., Torgovanov V.A. "Measuring scattering characteristics of radar targets" ("Izmerenie kharakteristik rasseyaniya radiolokatsionnykh tseley"), Moscow: Sovetskoe Radio, 1972, 232 p.

Submitted 28.05.2025; revised 30.06.2025

Information about the authors

Tigran S. Bagunts, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ctydent20@inbox.ru

Aleksandr V. Volod'ko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: zavlabvgtu@mail.ru

Evgeniy A. Ishchenko, graduate student, engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Roman V. Kuz'menko, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Mathematics and Natural Sciences of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (bldg. 1, 1A, Irkutskaya St., Voronezh 394072, Russia); Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: roman_kuzmenko@inbox.ru

Dmitriy K. Proskurin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rector@cchgeu.ru

Aleksey V. Ryabikin, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: riabikinalexei@yandex.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СЕКТОРНОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А.В. Останков, В.В. Ковалевская

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в ряде случаев к качеству формирования секторной диаграммы направленности (СДН) с помощью линейной антенной решётки предъявляются весьма жёсткие требования. Они касаются величины неравномерности вершины в угловом секторе, крутизны скатов, уровня бокового излучения. Цель работы – продемонстрировать целесообразность формирования СДН улучшенной формы методом параметрической оптимизации за счёт интервальной вариации значений введенной кусочно-постоянной весовой функции. Результатом параметрической оптимизации является амплитудное распределение на раскрыве решётки, обеспечивающее СДН, отличающуюся от идеальной минимальным значением среднеквадратического отклонения (СКО). При расчёте последнего использована весовая функция, интервальное распределение значений которой позволяет изменять основные показатели СДН. Для отыскания токов, запитывающих излучатели решётки, использована модифицированная версия генетического алгоритма. Приведены многочисленные результаты параметрической оптимизации в виде сформированных решёткой из 8-ми излучателей СДН с шириной сектора 60 градусов, полученных для разных интервальных распределений весовой функции. Результаты сопровождаются комментариями, позволяющими уяснить, как следует выбирать распределение значений весовой функции по интервалам для увеличения равномерности вершины, снижения уровня бокового излучения, увеличения крутизны скатов. Результаты включают найденные при оптимизации нормированные амплитудные распределения на раскрыве решётки. Показано, что в качестве идеальной СДН, относительно которой следует минимизировать СКО сформированной диаграммы, может быть использован сглаженный шаблон, оптимизированный и адаптированный для синтеза решётки одним из классических методов, например, методом парциальных диаграмм

Ключевые слова: секторная диаграмма направленности, антенная решётка, параметрическая оптимизация

Благодарности: исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 24-21-20034, <https://rscf.ru/project/24-21-20034/>

Введение

Антенна с идеальной секторной диаграммой направленности (СДН) должна излучать (принимать) по разным направлениям в пределах заданного сектора углов эквивалентный по величине поток мощности радиоволны. Вне этого сектора антенна не должна излучать (принимать) радиоволны. И если для панельных антенн базовых станций строгое соответствие антенне с идеальной СДН не является обязательным условием, то для ряда радиолокационных, гидроакустических и связных радиосистем качество формируемой СДН должно быть высоким. Так, например, весьма жёсткими являются требования к постоянству уровня мощности радиоволны в пределах ограниченного сектора для коммерческих систем радиовещания видеоконтента. За пределами рабочего сектора излучения антенны в таких системах быть не должно. Не менее важным является резкое пространственное ограничение потока мощности радиоволны, формируемой облучателем в направлении рефлектора или коллиматора. В пер-

вом случае равномерность диаграммы направленности (ДН) облучателя в секторе не предполагается, во втором – она обязательна.

Пусть СДН формируется линейной эквидистантной антенной решёткой слабонаправленных излучателей. В этом случае форма и качество СДН определяется амплитудно-фазовым распределением (АФР) на раскрыве решётки, а также количеством её излучателей.

Формирование СДН линейной антенной решётки за счёт реализации соответствующего АФР может обеспечиваться разными методами. К ним относятся методы интеграла Фурье [1], разложения диаграммы направленности в ряд Котельникова [2], метод парциальных диаграмм [3], метод параметрической оптимизации [4] и другие [1, 3].

Метод парциальных диаграмм является одним из самых наглядных способов получения ДН на основе лучей, описываемых функциями Котельникова и которым соответствуют виртуальные излучатели с равномерными амплитудными и линейными фазовыми распределениями тока. В качестве весовых коэффициентов диаграмм используются значения требуемой ДН в направлениях максимумов лучей. Недостатком

метода является его релевантность к решёткам длиной не менее 20λ (λ – длина волны).

Метод интеграла Фурье предполагает расчёт АФР на раскрыве антенны по требуемой ДН с помощью интегрального преобразования Фурье. Метод относительно прост, для его реализации требуется только найти спектр ДН по пространственной координате, этот спектр и будет искомой функцией АФР. Заметим, что заданная СДН может быть достаточно точно сформирована только решёткой заметно большего размера, чем у заданной решётки. Ограничение длины решётки за счёт числа элементов приводит к проявлению эффекта Гиббса. Вершина и основание сформированной СДН оказываются неравномерными, её скаты имеют конечную крутизну, вблизи перепадов СДН наблюдаются выбросы.

Метод разложения ДН в ряд Котельникова отличается от метода парциальных диаграмм тем, что весовые коэффициенты базисных функций Котельникова в разложении ДН определяются как обобщённый спектр шаблона ДН в базисе Котельникова. Далее по отсчётам Котельникова рассчитывается АФР на раскрыве. Поскольку ряд, в который раскладывается ДН, является конечным, то у сформированной СДН наблюдаются те же отклонения от идеальной, что и в случае использования ряда Фурье, однако, несколько другой величины. Заметим, что методы интеграла Фурье и разложения в ряд Котельникова примерно близки по эффективности, однако, метод интеграла Фурье позволяет сформировать СДН с меньшим уровнем бокового излучения, большей крутизной скатов, но с худшей равномерностью вершины [5].

В работах [5-10] для улучшения качества формирования СДН предложено использовать оптимизируемые сглаженные шаблоны. Шаблоны предназначены для прямого расчёта АФР на раскрыве решётки и отличаются от прямоугольного шаблона наличием сглаженных частей. Оптимизация шаблона предполагает подбор параметров, определяющих форму сглаженных частей, по заданному критерию, сводящему к минимуму степень отклонения сформированной СДН от идеальной.

Шаблон с линейными скатами вблизи вершины и основания СДН, предложенный в [5], позволил при синтезе методом интеграла Фурье снизить неравномерность вершины на 0.8 дБ и уровень боковых лепестков (УБЛ) ДН на 4 дБ у 8-элементной решётки с сектором в 90 градусов. Недостатком шаблона является существ-

венное отличие ширины сформированной СДН от требуемого сектора на 13 градусов.

В работах [6, 7] улучшение формируемой СДН достигается за счёт использования шаблона с управляемой угловой шириной и оптимизируемой параболической вершиной. Здесь же предложено дополнить целевую функцию (в виде среднеквадратического отклонения, СКО) ограничениями на уровень выбросов вершины ДН и (или) максимального УБЛ. При использовании метода разложения СДН в ряд Котельникова и оригинального шаблона удалось ограничить уровень выбросов вершины СДН 8-элементной решётки до 0.8 дБ при ширине СДН, равной 60-ти градусам, и максимальном УБЛ «минус» 18 дБ.

Оптимизируемый шаблон, в котором вертикальные скаты заменены гладкими отрезками косинусоиды, введённый в [8], также позволяет обеспечить требуемый сектор и заданный уровень неравномерности вершины СДН. Так, при использовании метода разложения в ряд Котельникова для 8-элементной решётки сформирована безлепестковая СДН с неравномерностью вершины 2 дБ в пределах углового сектора 90 градусов.

В работе [9] предложено дополнить шаблон, введённый в [5], адаптивной возможностью растяжения-сжатия по угловой ширине. Использование метода интеграла Фурье с ограничением в целевой функции (СКО \rightarrow min) неравномерности вершины СДН позволило не только обеспечить заданный сектор в 60 градусов, но и снизить неравномерность вершины на 2 дБ. Платой за максимальную гладкость СДН стало увеличение боковых лепестков на 7 дБ и снижение крутизны скатов ДН на 6 %. В [9] приведены результаты синтеза СДН с ограничением, накладываемым на максимальный УБЛ и крутизну скатов, а также при оптимизации по критерию минимума УБЛ.

Заметим, что в литературе относительно мало фактических данных о результатах синтеза антенных решёток с СДН методом параметрической оптимизации, в которых были бы приведены оптимальные АФР (см, например, [11-18]). Имеющиеся источники в основном делают упор на методику предлагаемого параметрического синтеза или содержат результаты в виде сформированных СДН без указания найденных АФР [12, 14, 16, 18].

Цель работы – попытаться восполнить имеющийся пробел и привести ряд найденных методом параметрической оптимизации квазиоптимальных АФР, позволяющих сформиро-

вать у линейной эквидистантной решетки СДН с улучшенными показателями качества.

Постановка задачи и метод её решения

Рассматривается линейная эквидистантная антенная решётка, содержащая восемь изотропных идентичных излучателей (рис. 1). Расстояние между соседними излучателями составляет половину длины излучаемой волны ($d = \lambda/2$). Изотропность ДН излучателей введена исключительно для универсальности и не является неизменным условием. Предполагается, что взаимная электродинамическая связь между излучателями полностью отсутствует. СДН формируется в плоскости меридионального угла (Θ) за счёт обеспечения подходящего амплитудного распределения. Начальные фазы токов (или полей), запитывающих излучатели, предполагаются равными нулю или 180 градусов. В последнем случае это соответствует токам, взятым со знаком «минус».

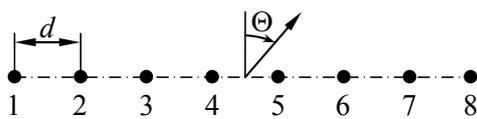


Рис. 1. Схема исследуемой антенной решётки

Антенная решётка является симметричной относительно центра, поэтому отысканию подлежат четыре тока, запитывающего излучатели.

Для отыскания неизвестных токов в излучателях предлагается использовать известную модификацию генетического алгоритма [19], многократно подтвердившего свою эффективность при решении ряда сходных задач (см, например, [20-22]). Алгоритм позволяет найти с определенной долей вероятности глобальный минимум целевой функции с несколькими аргументами. В нашем случае, аргументами целевой функции являются неизвестные токи I_k , $k=1..8$, а в качестве целевой функции использовано взвешенное СКО:

$$\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} w(\omega) |H(\Theta) - F(\Theta)|^2 d\Theta \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $H(\Theta)$ – желаемая ДН (идеальная СДН или определяемая сглаженным шаблоном), а $F(\Theta)$ – формируемая решёткой нормированная СДН.

Функция $w(\Theta)$ представляет собой неотрицательную вещественную весовую функцию,

придающую разную значимость различным частям угловой оси. Одной из задач, решаемых весовой функцией, является формирование скатов СДН, тогда в пределах таких зон её можно обнулить. Другая задача состоит в перераспределении погрешности формирования СДН между полосами пропускания и задерживания. В этом случае ей следует придать кусочно-постоянный характер разной величины.

Расчёт ненормированной ДН, формируемой антенной решёткой при питании её излучателей найденными токами I_k , производится в соответствии с известным соотношением [23]:

$$f(\Theta) = \left| \sum_{k=1}^8 I_k \cdot \exp(-j2\pi \cdot k \cdot d \cdot \sin\Theta / \lambda) \right|. \quad (2)$$

В качестве вторичных показателей сформированной СДН, применяемых для оценки её качества, предлагается использовать [6,9]:

- 1) разницу между фактической и требуемой шириной СДН $\Delta\Theta_m$, градусы;
- 2) неравномерность вершины ΔF или максимальное отклонение в центре сектора, дБ;
- 3) крутизну скатов, определяемую коэффициентом прямоугольности $K_n = \Delta\Theta_{0.7} / \Delta\Theta_0$, где $\Delta\Theta_{0.7}$, $\Delta\Theta_0$ – ширина ДН по уровню 0.707 и по первому нулю соответственно;
- 4) максимальный УБЛ, дБ;
- 5) СКО от идеальной СДН, %.

Результаты формирования СДН методом параметрической оптимизации

Ниже представлены результаты формирования СДН с сектором $\Theta_C = 60$ градусов за счёт реализации АФР методом параметрической оптимизации в виде нормированных ДН, показанных на фоне идеальной СДН. Поскольку формируемые СДН симметричны относительно направления нормали к раскрыву решётки, диаграммы показаны только для положительных направлений меридионального угла.

На рис. 2 в линейном масштабе показаны СДН, полученные на основе оптимизированных амплитудных распределений и интервальных значений использованных весовых функций, указанных в табл. 1.

Таблица 1

СДН (рис. 2) и интервальные значения $w(\Theta)$

№	$\Theta \in [-\Theta_C/2; +\Theta_C/2]$	другие Θ
1	1	1
2	5	1
3	10	1

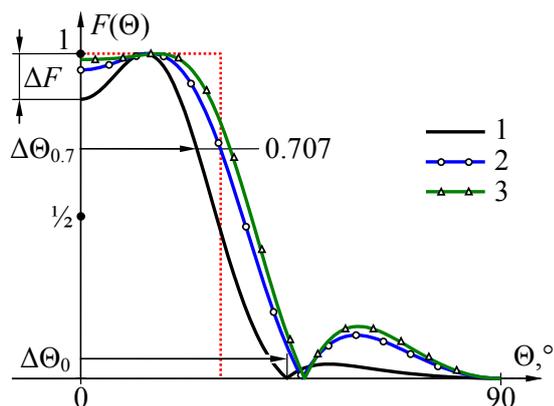


Рис. 2. СДН при увеличенном значении весовой функции в пределах ширины сектора

Соответствующие показанным на рис. 2 СДН вторичные показатели, а также амплитуды токов I_k приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вторичные показатели СДН (рис. 2) и АФР

Показатель	Позиция на рис. 2		
	1	2	3
$\Delta\Theta_m, ^\circ$	-10.2	-0.2	+4.0
$\Delta F, \text{дБ}$	-1.32	-0.45	-0.15
K_{Π}	0.57	0.63	0.67
УБЛ, дБ	-27.1	-17.5	-15.9
СКО, %	26.3	33.4	38.0
$I_k^{(1)} = (-0.096, -0.184, 0.316, 1.000);$ $I_k^{(2)} = (0.031, -0.228, 0.204, 1.000);$ $I_k^{(3)} = (0.067, -0.236, 0.170, 1.000).$			

Из рис. 2 и табл. 2 в частности следует, что приращение значения весовой функции в пределах 60-градусного сектора сопровождается увеличением ширины сформированной СДН, снижением неравномерности её вершины, ростом крутизны скатов. Однако при этом максимальный уровень бокового излучения существенно возрастает, увеличивается СКО от идеальной СДН. Так, при увеличении весовой функции в пределах сектора в 10 раз максимальный УБЛ снижается на 11.2 дБ, коэффициент прямоугольности увеличивается на 18 %, неравномерность вершины снижается на 1.17 дБ, ширина СДН возрастает на 28 %.

Изменение значений весовой функции в пределах требуемого сектора позволяет достаточно гибко регулировать величину всех вторичных параметров сформированной ДН. Соответствующие сформированным СДН амплитудные распределения пронормированы и включают в себя отрицательные значения токов.

На рис. 3 приведены формируемые решёткой СДН по оптимизированным амплитудным распределениям для случаев интервальных значений весовых функций из табл. 3.

Таблица 3

СДН (рис. 3) и интервальные значения $w(\Theta)$

№	$\Theta \in [-\Theta_C/2; +\Theta_C/2]$	другие Θ
1	1	1
2	1	5
3	1	10

Соответствующие показанным на рис. 3 СДН вторичные показатели, а также амплитуды токов приведены в табл. 4.

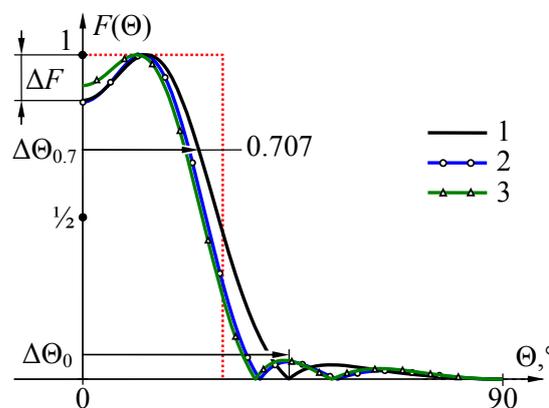


Рис. 3. СДН при увеличенном значении весовой функции за пределами сектора

Таблица 4

Вторичные показатели СДН (рис. 3) и АФР

Показатель	Позиция на рис. 2		
	1	2	3
$\Delta\Theta_m, ^\circ$	-10.2	-14.5	-16.2
$\Delta F, \text{дБ}$	-1.32	-1.37	-0.86
K_{Π}	0.57	0.60	0.59
УБЛ, дБ	-27.1	-25.4	-24.7
СКО, %	26.3	29.1	30.9
$I_k^{(1)} = (-0.096, -0.184, 0.316, 1.000);$ $I_k^{(2)} = (-0.173, -0.128, 0.411, 1.000);$ $I_k^{(3)} = (-0.169, -0.088, 0.445, 1.000).$			

Из рис. 3 и табл. 4 следует, что увеличение значения весовой функции вне сектора приводит к сужению ширины СДН и смещению скатов ДН внутрь 60-градусного сектора. При этом неравномерность вершины СДН может незначительно меняться как в большую, так и в меньшую сторону, крутизна скатов и максимальный УБЛ практически не изменяются, СКО от идеальной СДН растёт. Очевидно, что такой режим управления СДН предполагает равенство единице весовой функции в более широком диапа-

зоне углов наблюдения, по крайней мере, превышающем заданный угловой сектор.

Рассмотрим более сложные варианты распределений по интервалам значений весовой функции. На рис. 4 приведены формируемые решеткой СДН для интервальных значений весовых функций из табл. 5, где m показывает, какая часть сектора Θ_C соответствует увеличенному значению весовой функции.

Таблица 5

СДН (рис. 4) и интервальные значения $w(\Theta)$

№	$\Theta \in m \cdot [-\Theta_C/2; +\Theta_C/2]$	другие Θ
1	$m=0.8 / 10$	1
2	$m=0.8 / 5$	1
3	$m=0.6 / 10$	1

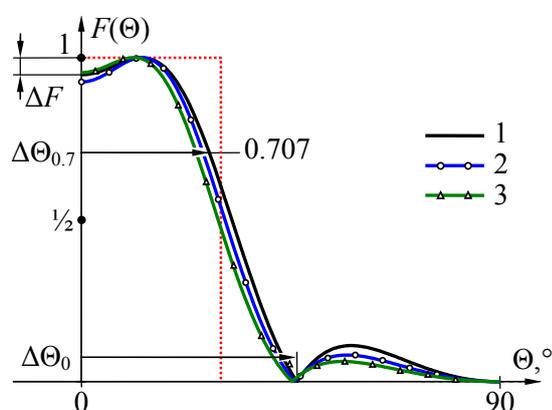


Рис. 4. СДН при увеличенном значении весовой функции в пределах части ширины сектора

Соответствующие показанным на рис. 4 СДН вторичные показатели, а также амплитуды токов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Вторичные показатели СДН (рис. 4) и АФР

Показатель	Позиция на рис. 2		
	1	2	3
$\Delta\Theta_m, \text{°}$	-5.2	-7.7	-10.7
$\Delta F, \text{дБ}$	-0.47	-0.67	-0.41
K_{Π}	0.59	0.57	0.54
УБЛ, дБ	-19.0	-21.7	-24.1
СКО, %	29.3	27.4	27.0
$I_k^{(1)} = (-0.003, -0.207, 0.260, 1.000);$ $I_k^{(2)} = (-0.036, -0.192, 0.286, 1.000);$ $I_k^{(3)} = (-0.050, -0.157, 0.323, 1.000).$			

Из рис. 4 и табл. 6 следует, что чем меньше часть сектора, соответствующая увеличенному значению $w(\Theta)$, тем уже ширина СДН, хуже крутизна скатов ДН, но при этом меньше неравномерность вершины, максимальный уро-

вень УБЛ и величина СКО. Заметим, что последнее отличает этот режим оптимизации за счёт распределения значений весовой функции от использованного на рис. 2 и табл. 2 в части противоположности поведения коэффициента прямоугольности и максимального УБЛ.

На рис. 5 приведены в логарифмическом масштабе формируемые решёткой СДН для случаев интервальных значений весовой функции из табл. 7, где m – коэффициент расширения углового сектора с единичным значением весовой функции.

Таблица 7

СДН (рис. 5) и интервальные значения $w(\Theta)$

№	$\Theta \in m \cdot [-\Theta_C/2; +\Theta_C/2]$	другие Θ
1	$m=1.2 / 1$	5
2	$m=1.4 / 1$	10
3	$m=1.6 / 1$	20

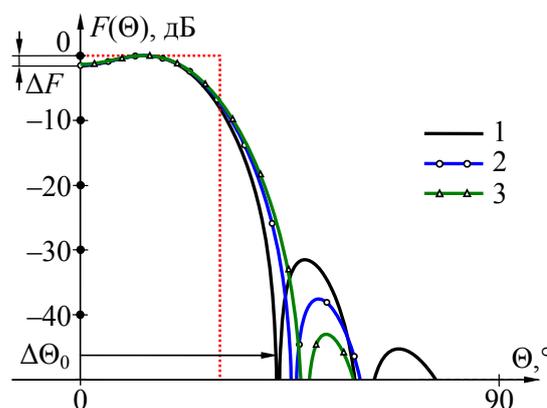


Рис. 5. СДН при увеличенном значении весовой функции в части полосы задержания

Соответствующие показанным на рис. 5 СДН вторичные показатели, а также амплитуды токов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Вторичные показатели СДН (рис. 5) и АФР

Показатель	Позиция на рис. 2		
	1	2	3
$\Delta\Theta_m, \text{°}$	-12.0	-11.0	-10.7
$\Delta F, \text{дБ}$	-1.57	-1.45	-1.34
K_{Π}	0.56	0.54	0.51
УБЛ, дБ	-31.5	-37.5	-43.0
СКО, %	26.8	26.4	26.5
$I_k^{(1)} = (-0.135, -0.166, 0.340, 1.000);$ $I_k^{(2)} = (-0.115, -0.167, 0.309, 1.000);$ $I_k^{(3)} = (-0.106, -0.163, 0.297, 1.000).$			

Из рис. 5 и табл. 8 следует, что расширение углового сектора, в пределах которого ве-

совая функция равна минимальному значению при увеличенном значении вне сектора сопровождается существенным снижением уровня бокового излучения и незначительным ухудшением крутизны скатов. Остальные показатели СДН практически не изменяются.

Таким образом, использование кусочно-постоянной весовой функции при оптимизации формы реализуемой решёткой СДН является не только вполне оправданным, но и необходимым фактором, так как позволяет получать нестандартный набор показателей СДН. По сути, должным образом сформированная весовая функция исполняет роль шаблона, таковым, в общем-то, не являясь. Анализ статистики поведения сформированных СДН в зависимости от интервального распределения весовой функции даёт возможность приблизиться к оптимальным показателям СДН.

Представляет особый интерес тезис о том, что для формирования оптимальной СДН разумно использовать предварительно сглаженный шаблон. Имеется в виду, что в качестве идеальной СДН, относительно которой и минимизируется СКО получаемой при параметрической оптимизации СДН, представляет собой не прямоугольную функцию, а особым образом сглаженную. Получить такой сглаженный шаблон можно разными способами [6-10], например, оптимизируя его форму по критерию минимума СКО при синтезе решётки одним из классических методов. Пусть синтез производится методом парциальных диаграмм по шаблону, предложенному в [8] и представляющему собой деформируемую по ширине трапецию с косинусоидальными скатами. Параметры шаблона подбираются так, чтобы СКО СДН относительно идеальной прямоугольной было минимальным. Такой оптимизированный шаблон применительно к 8-элементной решётке и 60-градусному сектору имеет вид, показанный на рис. 6 (поз. 1). Здесь же приведена СДН (поз. 2), полученная методом парциальных диаграмм. Анализ СДН, показывает, что, несмотря на малую неравномерность вершины ($\Delta F = -0.05$ дБ) и соответствие ширины требуемой величине сектора ($\Delta\Theta_m = 0^\circ$), максимальный УБЛ составляет всего «минус» 18.7 дБ, коэффициент прямоугольности 0.62, СКО – 34.0 %. СДН, сформированная методом параметрической оптимизации по сглаженному шаблону, показана на рис. 6 (поз. 3) и обладает следующими параметрами: $\Delta\Theta_m = -3^\circ$, $\Delta F = -0.18$ дБ, коэффициентом прямоугольности – 0.56, максимальным УБЛ – «минус» 23.5 дБ, СКО – 31.8 %. Амплитудное распределение при этом имеет вид: $I_k = (0.011, -0.172, 0.202, 1.000)$. Таким образом,

шаблон, являющийся наилучшим для формирования СДН методом парциальных диаграмм, вполне может быть использован для синтеза решётки методом параметрической оптимизации. При этом он, в частности, обеспечивает меньшие СКО и уровень бокового излучения.

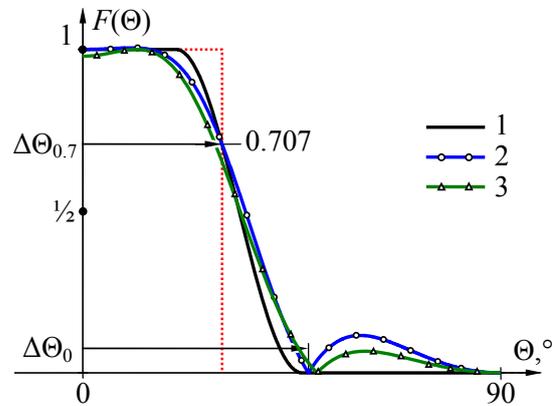


Рис. 6. СДН, полученные по сглаженному шаблону, предложенному в [8]

Заключение

С использованием метода параметрической оптимизации и модифицированной версии генетического алгоритма выполнен синтез линейной эквидистантной антенной решётки с секторной диаграммой направленности. Представлены результаты синтеза для случая 60-градусного сектора, числа излучателей решётки, равного 8-ми, и оптимизации амплитудного распределения. Установлено, что улучшение показателей СДН возможно при использовании кусочно-постоянной весовой функции, являющейся сомножителем квадрата разности формируемой и идеальной СДН в минимизируемом СКО, и вариации её значений в разных интервалах. Все представленные варианты сформированной СДН сопровождаются найденными амплитудными распределениями. Дальнейшим направлением развития представленного оригинального материала является реализация конкретных схем питания наиболее предпочтительных вариантов формирования СДН применительно к конкретной реализации излучателей антенной решётки [24, 25].

Литература

1. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решётки и антенны с непрерывным раскрытием. М.: Сов. радио, 1980. 296 с.
2. Вендик О.Г. Синтез линейки излучателей с механическим качанием луча // Известия ВУЗов. Радиотехника. 1960. Т. 3. № 1. С. 77-86.
3. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем (теория и методы расчета). М.: Сов. радио, 1974. 232 с.

4. Bird T. Fundamentals of aperture antennas and arrays. New York: John Wiley & Sons, 2016. 449 p.
5. Митрохин В.Н., Пропастин А.А. Синтез излучающей системы, формирующей секторную диаграмму направленности с минимизацией эффекта Гиббса // Радиоптика. 2016. № 6. С. 1-13.
6. Останков А.В., Нечаев А.С., Дашян С.Ю. Синтез фазированной антенной решетки с секторной диаграммой направленности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 3. С. 78-84.
7. Synthesizing the sector directional pattern with improved quality indicators / A. Oostankov, A. Nechaev, S. Dachian [et al.] // 2022 ELEKTRO. 2022. pp. 1-5.
8. Останков А.В., Щетинин Н.Н. Синтез максимально гладкой секторной диаграммы направленности фазированной антенной решетки // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2020. Т. 1. С. 435-438.
9. Останков А.В., Шаненкова В.В., Щетинин Н.Н. Синтез антенной решетки с секторной диаграммой направленности по сглаженному шаблону // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXXI Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. С. 1-10.
10. Кирпичева И.А., Останков А.В., Рябчунов А.И. Оптимизация шаблона для повышения эффективности синтеза антенной решетки с косекансной диаграммой направленности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 106-112.
11. Srinivasareddy S., Narayana Y.V., Krishna D. Sector beam synthesis in linear antenna arrays using social group optimization algorithm // National Journal of Antennas and Propagation. 2021. Vol. 3. No. 2. pp. 6-9.
12. Palacios J., De Donno D., Widmer J. Lightweight and effective sector beam pattern synthesis with uniform linear antenna arrays // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2017. Vol. 16. pp. 605-608.
13. Patidar H., Mahanti G. K., Muralidharan R. Synthesis and failure correction of flattop and cosecant squared beam patterns in linear antenna arrays // Journal of Telecommunications and Information Technology. 2017. Vol. 70. No. 4. pp. 25-30.
14. Misra B., Deb A. Synthesis of antenna arrays with flat-top pattern using conventional and random drift particle swarm optimization algorithms // 2018 Emerging Trends in Electronic Devices and Computational Techniques. 2018. pp. 1-5.
15. Jamunaa D., Mahanti G.K., Hasoon F.N. Synthesis of phase-only position optimized reconfigurable uniformly excited linear antenna arrays with a single null placement // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. 2020. Vol. 32. No. 6. pp. 360-367.
16. Ogurtsov S., Caratelli D., Song Z. A review of synthesis techniques for phased antenna arrays in wireless communications and remote sensing // International Journal of Antennas and Propagation. 2021. Art. 5514972.
17. Mahanti G.K., Chakrabarty A. Phase-only and amplitude-phase synthesis of dual-pattern linear antenna arrays using floating-point genetic algorithms // Progress In Electromagnetics Research. 2007. Vol. 68. pp. 247-259.
18. Nandi P., Roy J.S. Performance comparison of optimization methods for flat-top sector beamforming in a cellular network // Journal of Telecommunication and Information Technology. 2022. No. 3. pp. 39-46.
19. Сабанин В.Р., Смирнов Н., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении // Exponenta Pro: Математика в приложениях. 2004. № 3-4. С. 78-85.
20. Potentially achievable levels of lateral radiation of an equal-amplitude nonuniformly-filled array / A. Oostankov [et al.] // Proceedings of the 13th International Conference on Measurement. 2021. pp. 216-219.
21. Калинин Ю.Е., Останков А.В. Расчет частотно-сканирующей антенны дифракционного излучения // Радиотехника. 2014. № 3. С. 83-87.
22. A simple method for increasing the equal-amplitude non-uniform linear thinned array directivity / O.V. Chernoyarov, A.V. Salnikova, I.A. Kirpicheva, A.V. Oostankov // 2019 5th International Conference on Frontiers of Signal Processing. 2019. pp. 117-120.
23. Hansen R.C. Phased array antennas: Second edition. John Wiley & Sons, Inc., 2009. 547 p.
24. Крячко А.Ф., Рыжиков М.Б. Формирование заданного амплитудного распределения в микрополосковой антенной решетке с прямоугольными излучателями посредством изменения их ширины // Информация и космос. 2024. № 1. С. 21-27.
25. Evaluating the efficiency of the longitudinal variation of the distribution-radiating system of the leaky-wave antenna / D.Y. Kryukov, A.V. Oostankov, L. Golpaiegany, E.V. Chernoiarova // International Journal on Communications Antenna and Propagation. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 154-163.

Поступила 14.05.2025; принята к публикации 30.06.2025

Информация об авторах

Останков Александр Витальевич — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: avostankov@mail.ru

Ковалевская Валерия Владимировна — магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rt.kaf@cchgeu.ru

FORMATION OF A SECTOR RADIATION PATTERN OF A LINEAR ANTENNA ARRAY BY THE METHOD OF PARAMETRIC OPTIMIZATION

A.V. Oostankov, V.V. Kovalevskaya

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in some cases, the quality of the formation of a sector radiation pattern using a linear antenna array is subject to very strict requirements. They concern the magnitude of the peak unevenness in the angular sector, the steepness of the slopes, and the level of lateral radiation. The purpose of this work is to demonstrate the feasibility of forming a sector radiation pattern of an improved shape using the parametric optimization method due to the interval variation of the values of the introduced piecewise constant weight function. The result of parametric optimization is the amplitude distribution on the array aperture, providing a sector radiation pattern that differs from the ideal one by the minimum value of the standard deviation. When calculating the latter, we used a weight function, the interval distribution of the values of which allows changing the main indicators of the sector radiation pattern. We used a modified version of the genetic algorithm to find the currents feeding the array radiators. We present numerous results of parametric optimization in the form of a sector pattern formed by an array of 8 radiators with a sector width of 60 degrees, obtained for different interval distributions of the weighting function. We accompanied the results with comments that help to understand how to select the distribution of the weighting function values by intervals to increase the uniformity of the top,

reduce the level of lateral radiation, and increase the steepness of the slopes. The results include the normalized amplitude distributions on the array aperture found during optimization. We show that a smoothed template optimized and adapted for array synthesis by one of the classical methods, for example, the method of partial diagrams, can be used as an ideal sector pattern of the radiation pattern, relative to which the standard deviation of the formed pattern should be minimized

Key words: sector radiation pattern, antenna array, parametric optimization

Acknowledgments: the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation no. 24-21-20034, <https://rscf.ru/project/24-21-20034/>

References

1. Zelkin E.G., Sokolov V.G. "Methods of antenna synthesis: Phased antenna arrays and antennas with continuous aperture" ("Metody sinteza antenn: Fazirovannyye anteny i anteny s nepreryvnym raskryvom"), Moscow: Sov. radio, 1980, 296 p.
2. Vendik O.G. "Synthesis of a line of emitters with non-mechanical beam swing", *News of Higher Education Institutions. Radio Engineering (Izvestiya VUZov. Radiotekhnika)*, 1960, vol. 3, no. 1, pp. 77-86.
3. Bakhrakh L.D., Kremenetsky S.D. "Synthesis of radiating systems (theory and calculation methods)" ("Sintez izluchayushchikh sistem (teoriya i metody rascheta)"), Moscow: Sov. radio, 1974, 232 p.
4. Bird T. "Fundamentals of aperture antennas and arrays", New York: John Wiley & Sons, 2016, 449 p.
5. Mitrokhin V.N., Propastin A.A. "Synthesis of a radiating system forming a sector radiation pattern with minimization of the Gibbs effect", *Radio-optics (Radio-optika)*, 2016, no. 6, pp. 1-13.
6. Ostankov A.V., Nechaev A.S., Dashyan S.Yu. "Synthesis of a phased antenna array with a sector radiation pattern", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 3, pp. 78-84.
7. Ostankov A., Nechaev A., Dachian S. et al. "Synthesizing the sector directional pattern with improved quality indicators", 2022 ELEKTRO, 2022, pp. 1-5.
8. Ostankov A.V., Shchetinin N.N. "Synthesis of the maximally smooth sector radiation pattern of a phased antenna array", *Proc. of the Int. Scientific and Practical. conf.: Engineering and Safety of Penal System Facilities (Tekhnika i bezopasnost' ob"ektov ugolovno-ispolnitel'noy sistemy)*, Voronezh: Nauchnaya kniga, 2020, vol. 1, pp. 435-438.
9. Ostankov A.V., Shanenkova V.V., Shchetinin N.N. "Synthesis of an antenna array with a sector radiation pattern using a smoothed template", *Proc. of the XXXI Int. Sci. and Tech. Conf.: Radio Location, Navigation, Communications (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz')*, Voronezh: Publishing house of VSU, 2025, pp. 1-10.
10. Kirpicheva I.A., Ostankov A.V., Ryabchunov A.I. "Optimization of a template to improve the efficiency of synthesis of an antenna array with a cosecant radiation pattern", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 106-112.
11. Srinivasareddy S., Narayana Y.V., Krishna D. "Sector beam synthesis in linear antenna arrays using social group optimization algorithm", *National Journal of Antennas and Propagation*, 2021, vol. 3, no. 2, pp. 6-9.
12. Palacios J., De Donno D., Widmer J. "Lightweight and effective sector beam pattern synthesis with uniform linear antenna arrays", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, pp. 605-608.
13. Patidar H., Mahanti G. K., Muralidharan R. "Synthesis and failure correction of flattop and cosecant squared beam patterns in linear antenna arrays", *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2017, vol. 70, no. 4, pp. 25-30.
14. Misra B., Deb A. "Synthesis of antenna arrays with flat-top pattern using conventional and random drift particle swarm optimization algorithms", *2018 Emerging Trends in Electronic Devices and Computational Techniques*, 2018, pp. 1-5.
15. Jamunaa D., Mahanti G.K., Hasoon F.N. "Synthesis of phase-only position optimized reconfigurable uniformly excited linear antenna arrays with a single null placement", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 2020, vol. 32, no. 6, pp. 360-367.
16. Ogurtsov S., Caratelli D., Song Z. "A review of synthesis techniques for phased antenna arrays in wireless communications and remote sensing", *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, art. 5514972.
17. Mahanti G.K., Chakrabarty A. "Phase-only and amplitude-phase synthesis of dual-pattern linear antenna arrays using floating-point genetic algorithms", *Progress In Electromagnetics Research*, 2007, vol. 68, pp. 247-259.
18. Nandi P., Roy J.S. "Performance comparison of optimization methods for flat-top sector beamforming in a cellular network", *Journal of Telecommunication and Information Technology*, 2022, no. 3, pp. 39-46.
19. Sabanin V.R., Smirnov N., Repin A.I. "Modified genetic algorithm for optimization problems in control", *Exponenta Pro: Mathematics in Applications (Exponenta Pro: Matematika v prilozheniyakh)*, 2004, no. 3-4, pp. 78-85.
20. Ostankov A., San K.M., Chernoyarov O., Pergamenchtchikov S. "Potentially achievable levels of lateral radiation of an equal-amplitude nonuniformly-filled array", *Proc. of the 13th Int. Conf. on Measurement*, 2021, pp. 216-219.
21. Kalinin Yu.E., Ostankov A.V. "Calculation of frequency-scanning antenna of diffraction radiation", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 3, pp. 83-87.
22. Chernoyarov O.V., Salnikova A.V., Kirpicheva I.A., Ostankov A.V. "A simple method for increasing the equal-amplitude non-uniform linear thinned array directivity", *Proc. of the 2019 5th Int. Conf.: Frontiers of Signal*, 2019, pp. 117-120.
23. Hansen R.C. "Phased array antennas: Second edition", John Wiley & Sons, Inc., 2009, 547 p.
24. Kryachko A.F., Ryzhikov M.B. "Formation of a given amplitude distribution in a microstrip antenna array with rectangular radiators by changing their width", *Information and Space (Informatsiya i kosmos)*, 2024, no. 1, pp. 21-27.
25. Kryukov D.Y., Ostankov A.V., Golpaigany L., Chernoiarova E.V. "Evaluating the efficiency of the longitudinal variation of the distribution-radiating system of the leaky-wave antenna", *International Journal on Communications Antenna and Propagation*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 154-163.

Submitted 14.05.2025; revised 30.06.2025

Information about the authors

Aleksandr V. Ostankov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru
Valeriya V. Kovalevskaya, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: lera.kovalevskaya.2002@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АНТЕННЫХ СИСТЕМ НА БРОНЕТРАНСПОРТЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.А. Ищенко, А.Е. Медведев, А.И. Скребнев, А.А. Силонов, А.И. Сукачев, И.А. Сафонов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается проблема оптимизации размещения антенных систем на бронетранспортере БТР-80 с использованием методов электродинамического моделирования. Исследованы характеристики антенн различных диапазонов (КВ, УКВ, СВЧ) с учетом влияния металлического корпуса транспортного средства. Проведено компьютерное моделирование в программном комплексе CST Studio Suite, включая анализ диаграмм направленности и трассировки лучей. Результаты показали, что оптимальное расположение антенн, особенно в задней части корпуса, минимизирует переотражения сигнала и обеспечивает устойчивую связь. Для КВ-антенны (15 МГц) наилучшие результаты достигнуты при размещении на крыше, в то время как УКВ-антенна (433 МГц) демонстрирует стабильную работу при установке на боковых частях корпуса. СВЧ-антенна (2.4 ГГц) показала наилучшие характеристики при размещении на башне орудия, что позволило снизить влияние паразитных лепестков. Высокая точность моделирования подтверждена сравнением с экспериментальными данными. Исследование подчеркивает важность учета частотных особенностей и геометрии корпуса при проектировании антенных систем для военной техники. Результаты работы могут быть применены для улучшения качества связи и снижения помех в условиях ограниченного пространства и сложной электромагнитной обстановки

Ключевые слова: антенные системы, бронетранспортер, электродинамическое моделирование, CST Studio Suite, диаграмма направленности, трассировка лучей, КВ-антенна, УКВ-антенна, СВЧ-антенна, переотражение сигнала

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003

Введение

Размещение антенн на БТР (бронетранспортере) крайне важно, так как оно напрямую влияет на качество связи, дальность передачи сигнала и устойчивость к помехам. Характеристики размещения антенн на БТР зависят от диапазона частот (КВ, УКВ, СВЧ).

Антенны КВ-диапазона обычно имеют большие размеры и требуют размещения на высокой точке (например, на крыше) для увеличения дальности связи. Важно учитывать влияние металлического корпуса БТР, который может отражать сигнал. Антенны УКВ-диапазона более компактны, но их размещение должно обеспечивать минимальные помехи от корпуса БТР. Обычно их устанавливают на крыше или боковых частях для обеспечения прямой видимости и устойчивой связи. Антенны СВЧ-диапазона требуют точного размещения для минимизации потерь сигнала. Их часто устанавливают на выносных мачтах или специальных креплениях, чтобы избежать экранирования корпусом БТР и обеспечить направленную связь.

Рассмотрение интеграции, проектирования и моделирования множества беспроводных систем и антенн в современных автомобилях [1]. По результатам исследования можно сделать вывод, что использование современных инструментов моделирования позволяет эффективно проектировать и размещать антенны на транспортных средствах, обеспечивая их корректную работу и совместимость в условиях ограниченного пространства.

Применение технологии «автомобиль-автомобиль» (V2V) для повышения безопасности водителей [2]. По результатам исследования можно сделать вывод, что тип, размещение и ориентация антенн V2V существенно влияют на производительность системы связи. Использование программного обеспечения для моделирования высокочастотных электромагнитных полей позволяет анализировать характеристики дальнего поля различных конфигураций антенн без необходимости физического тестирования. Предложен метод оптимизации размещения и ориентации монополярной антенны на автомобиле с использованием глобального метода поверхности отклика (GRSM). Результаты показывают, что предложенная конфигурация антенны обеспечивает более сильное и равномерное излучение в дальнем поле при минималь-

ном коэффициенте отражения. Для анализа использован метод многоуровневого быстрого мультипольного метода (MLFMM). Данный подход позволяет улучшить производительность, снизить затраты и сократить время разработки систем антенн V2V.

Возможность размещения антенных систем HF-VHF на нижней части автомобиля с точки зрения всенаправленности, эффективности и потерь при распространении сигнала [3]. По результатам исследования можно сделать вывод, что предложена точная и численно эффективная процедура расчета потерь при распространении сигнала для источников, расположенных вблизи реальных поверхностей. Показано, что несмотря на то, что источники, расположенные в нижней части, уступают традиционно установленным антеннам по всенаправленности и эффективности в дальней зоне, в ближней зоне (на расстояниях менее 10 м и частотах от 20 до 100 МГц) потери при распространении сопоставимы. Результаты указывают на частотный диапазон, в котором антенны могут быть скрыты в нижней части автомобиля и использоваться для новых приложений короткого радиуса действия.

Подход сочетает измерения антенн с моделированием электромагнитных полей для анализа на уровне системы автомобиля [4]. По результатам исследования можно сделать вывод, что предложенный метод позволяет эффективно изучать размещение антенн и электромагнитную совместимость (ЭМС) на примере модели автомобиля с антенной типа «акулий плавник». Подход демонстрирует высокую точность и вычислительную эффективность, а также предоставляет производителям автомобилей возможность проводить критически важные исследования размещения антенн и оценки соответствия требованиям ЭМС даже при отсутствии данных компьютерного проектирования антенны.

Временные изменения канала распространения в системах связи между транспортными средствами (V2V), которые оказывают значительное влияние на производительность беспроводной системы, включая такие параметры, как пропускная способность канала и вероятность сбоя [5]. По результатам исследования можно сделать вывод, что в симуляциях, предполагая знание характеристик канала, эти параметры обычно рассчитываются с использованием изотропных излучателей вместо реальных антенн, что приводит к игнорированию влияния параметров антенн. Важно отметить, что

целью данной работы является исследование возможной конфигурации антенн, состоящей из трех антенн, установленных в различных позициях на автомобиле, и описание различий между реальной и соответствующей изотропной конфигурацией для определенного сценария канала. Подход демонстрирует важность учета характеристик реальных антенн для повышения точности моделирования и оценки производительности систем V2V.

Проблема увеличения количества антенн, устанавливаемых на транспортных средствах, связанная с разнообразием текущих и будущих беспроводных сервисов [6]. По результатам исследования можно сделать вывод, что количество доступных позиций для установки антенн сокращается из-за ограничений в дизайне или добавления новых электронных компонентов. Для обеспечения стабильных соединений и повышения скорости передачи данных в условиях ограниченного пространства предлагается использование многоканальных антенных систем. Важно отметить, что в данной работе рассматриваются и оцениваются 16 возможных позиций для установки антенн для связи между автомобилями (Car-to-Car, C2C). Для определения диаграмм направленности всех антенн используется подход синтеза антенн, максимизирующий пропускную способность, учитывающий реальные ограничения, такие как доступное пространство, мощность передачи, количество и расположение антенн. Для сравнения различных конфигураций используется расчет пропускной способности канала, выполненный на основе виртуальных поездок через типичные сценарии применения. Результаты исследования показывают, какие отдельные позиции и комбинации позиций антенн наиболее подходят для связи C2C. Подход демонстрирует эффективность предложенной методики для оптимизации размещения антенн и повышения производительности беспроводных систем в условиях ограниченного пространства.

Эмпирические результаты исследования, посвященного влиянию разнообразия антенн и их размещения на производительность связи между транспортными средствами в VANET (Vehicular Ad Hoc Networks) [7]. По результатам исследования можно сделать вывод, что в экспериментах использовались всенаправленные антенны, установленные на крыше и внутри транспортного средства, а также радиостанции стандарта IEEE 802.11a, работающие в диапазоне 5 ГГц, который представляет интерес для планируемых стандартов межтранс-

портной связи. Основные результаты исследования заключаются в следующем. Во-первых, показано, что качество приема радиосигнала в диапазоне 5 ГГц сильно зависит от размещения антенн. Во-вторых, результаты демонстрируют, что использование схемы выбора пакетов на уровне разнообразия (Multi-Radio Packet Selection, MRPS) с использованием нескольких антенн и радиостанций улучшает производительность не только в условиях затухания сигнала, но и в условиях прямой видимости. Это связано с влиянием геометрии автомобиля на распространение сигнала, что приводит к формированию сильно неоднородных диаграмм направленности антенн. Важно отметить, что диаграммы направленности крайне чувствительны к точному положению антенны на крыше. Например, при мощности передачи 40 мВт дальность связи в условиях прямой видимости варьировалась от 50 до 250 метров в зависимости от ориентации автомобилей. Эти результаты имеют значение для разработки протоколов управления доступом к среде для транспортных сетей. Протоколам, возможно, придется учитывать увеличение числа скрытых узлов из-за направленных диаграмм антенн. Однако производители автомобилей могут уменьшить эти эффекты за счет тщательного размещения антенн и использования схем разнообразия. Подход демонстрирует важность оптимизации размещения антенн и применения технологий разнообразия для повышения производительности и надежности связи в VANET.

Новая антенна, установленная под апертурой в крыше внедорожника, под пластиковой панелью, аналогичной слоту для люка [8]. По результатам исследования можно сделать вывод, что данное решение предлагает альтернативное место для размещения антенны на транспортном средстве. Антенна имеет размеры 88,2 см × 18,5 см и идеально подходит для установки в ограниченном пространстве апертуры крыши автомобиля. Важно отметить, что антенна оснащена семью фидерами и способна обеспечивать одновременную работу следующих систем связи: FM, AM, TV, TMC и прием DAB-аудио. Два дополнительных элемента/фидера используются для целей разнесенного приема. Проведено сравнение измерений и моделирования предложенной антенной системы на частоте 100 МГц. Моделирование характеристик антенной системы также выполнено для частот 200 МГц и 450–800 МГц. Подход демонстрирует эффективность предложенной конструкции антенны для интеграции в ограниченное пространство крыши ав-

томобиля, обеспечивая поддержку множества систем связи с высокой функциональностью и компактностью.

Использование антенн, устанавливаемых на транспортных средствах на частотах УКВ (VHF), где традиционно применяются штыревые и петлевые антенны [9]. По результатам исследования можно сделать вывод, что механические ограничения часто вынуждают размещать антенны в неоптимальных позициях. В данной работе рассматривается использование боковых петлевых антенн на прямоугольных проводящих платформах. Важно отметить, что высокие и узкие платформы излучают аналогично диполю. Кроме того, при увеличении толщины платформы петлевые антенны могут излучать практически всенаправленно, если стороны платформы, на которых установлены антенны, не слишком широки. Это связано с тем, что узкая ширина платформы обеспечивает преимущественно вертикальное распределение возвратных токов для петлевой антенны. Подход демонстрирует возможность улучшения характеристик излучения антенн на транспортных средствах за счет оптимизации конструкции и размещения, что особенно важно для обеспечения эффективной связи на частотах УКВ.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что размещение антенн на транспортном средстве является важным для обеспечения надежной и стабильной связи. В данной работе будут рассматриваться оптимальные места для расположения антенных систем различных диапазонов (КВ, УКВ, СВЧ) на носителе (БТР-80).

КВ-антенна

Для исследования была выбрана всенаправленная КВ-антенна, работающая на частоте 15 МГц. Для работы на частоте 15 МГц диаметр будет составлять 6 мм, а высота — 4.828 м.

Антенна демонстрирует согласование в полосе частот (уровень коэффициента отражения ниже -10 дБ), что обеспечивает её эффективную работу не только на центральной частоте 15 МГц, но и в соседних частотных диапазонах. Это особенно важно для КВ-связи, где часто требуется перекрытие широкого частотного спектра. Антенна является всенаправленной, коэффициент направленного действия (КНД) равен 3.24 дБ.

УКВ-антенна

Для исследования была выбрана всенаправленная УКВ-антенна, работающая на частоте 433 МГц. Для работы на частоте 433 МГц диаметр будет составлять 6 мм, а высота — 162 мм.

Полоса согласования антенны охватывает диапазон вокруг 433 МГц, что позволяет использовать её для передачи широкополосных сигналов, характерных для УКВ-связи. Это подтверждает пригодность антенны для реальных условий эксплуатации, где частотная стабильность может варьироваться.

Антенна является всенаправленной, коэффициент направленного действия (КНД) равен 3.24 дБ.

СВЧ-антенна

Для исследования была выбрана всенаправленная СВЧ-антенна, работающая на частоте 2.4 ГГц. Для работы на частоте 2.4 ГГц диаметр будет составлять 1 мм, а количество элементов — 4.

Получен диапазон рабочей частоты 2.4 ГГц (на уровне ниже -10 дБ). Широкая полоса согласования ($2.4 \text{ ГГц} \pm \Delta f$) подтверждает, что антенна пригодна для работы с широкополосными сигналами, такими как Wi-Fi или Bluetooth, где требуется устойчивость к частотным отклонениям и многоканальности. Антенна является всенаправленной, коэффициент направленного действия (КНД) равен 1.38 дБ.

Расположение антенных систем на носителе (БТР) и проведение моделирования

В качестве носителя антенной системы был выбран и промоделирован БТР-80, представленный на рис. 1.



Рис. 1. Трёхмерная модель БТР-80

Для точности измерений важно правильно подобрать материалы. Для колёс был выбран материал резина, а для самого корпуса — низкоуглеродистый сплав «Сталь 1010», который ближе всего по своим характеристикам схож с материалом корпуса на настоящем БТР.

Готовая модель была импортирована в CST Studio Suite (профессиональное программное обеспечение для электромагнитного анализа в 3D). Расположенная КВ-антенна (15 МГц) изображена на рис. 2.

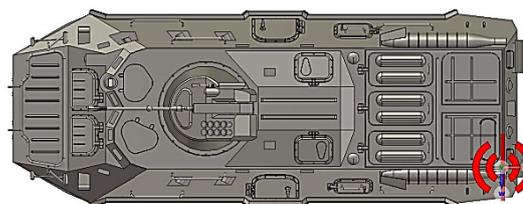


Рис. 2. Расположение КВ-антенны

Далее был проведен асимптотический анализ, который обладает высокой эффективностью, точностью и скоростью расчёта [1], а именно исследование диаграммы направленности. Результаты анализа представлены на рис. 3.

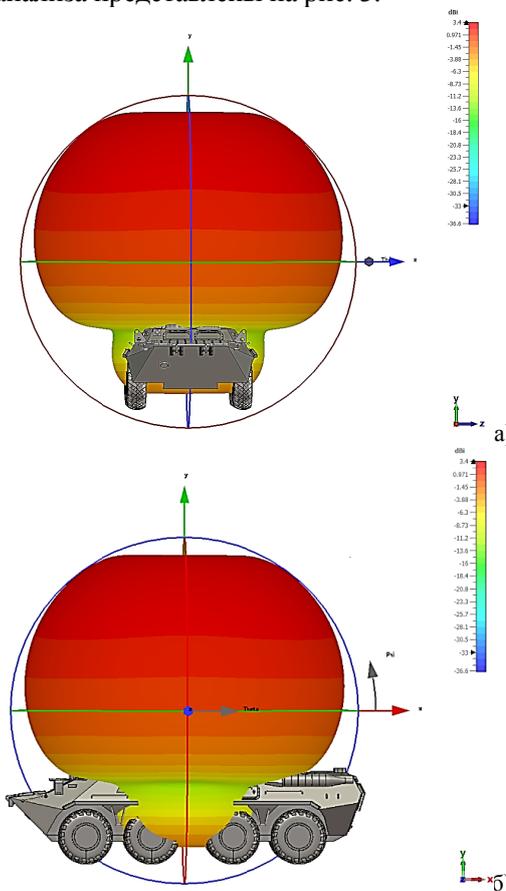


Рис. 3. Диаграмма направленности КВ-антенны

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что диаграмма направленности ослабевает на краях корпуса из-за переотражения сигнала. Был проведён анализ трассировки лучей, представленный на рис. 4.

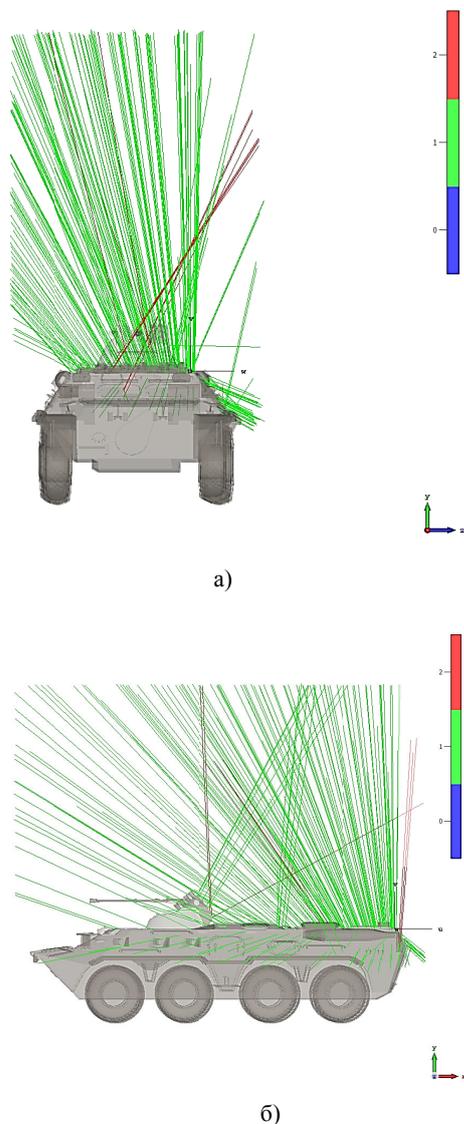


Рис. 4. Трассировка лучей КВ-антенны

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что возле орудия и в задней части транспортного средства лучи отражаются от корпуса дважды, а в остальных случаях – один раз.

Следующим этапом было расположение УКВ-антенны (433 МГц), представленное на рис. 5.

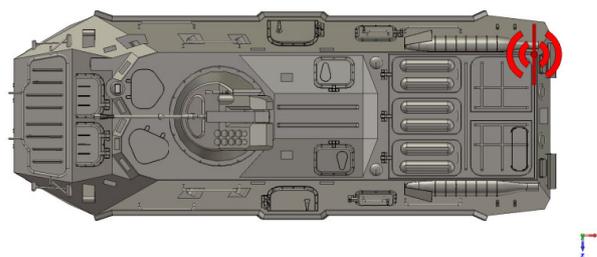


Рис. 5. Расположение УКВ-антенны

Проведено моделирование диаграммы направленности. Результаты анализа представлены на рис. 6.

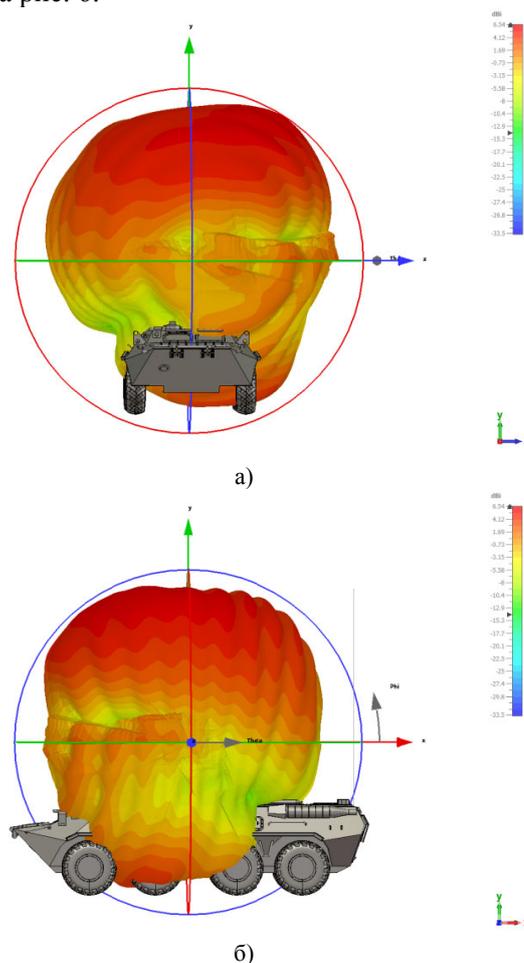
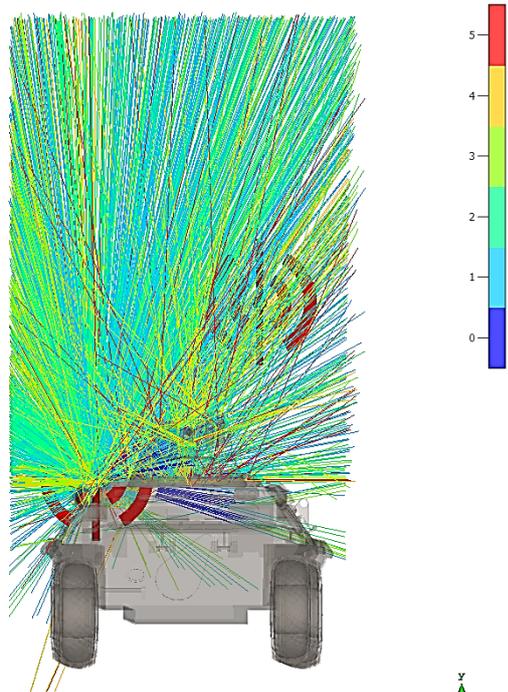


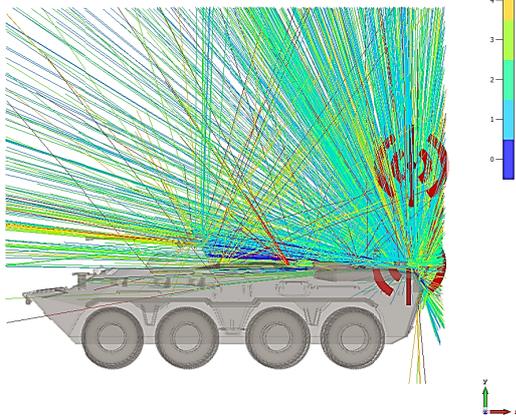
Рис. 6. Диаграмма направленности УКВ-антенны на носителе

Можно сделать вывод о том, что диаграмма направленности искажена минимально. Проведён анализ трассировки лучей, представленный на рис. 7.

Моделирование показало, что УКВ-антенна, работающая на более высоких частотах, сильнее подвержена переотражениям по сравнению с КВ-антенной. Это связано с тем, что более высокие частоты больше переотражаются от препятствий.



а)



б)

Рис. 7. Трассировка лучей УКВ-антенны на носителе

Следующим этапом было расположение СВЧ-антенны (2.4 ГГц), представленное на рис. 8.

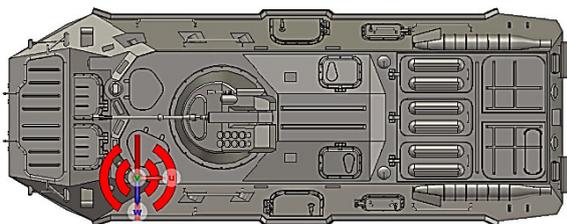
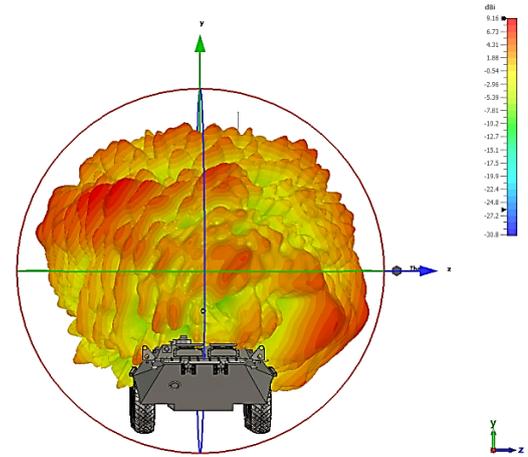
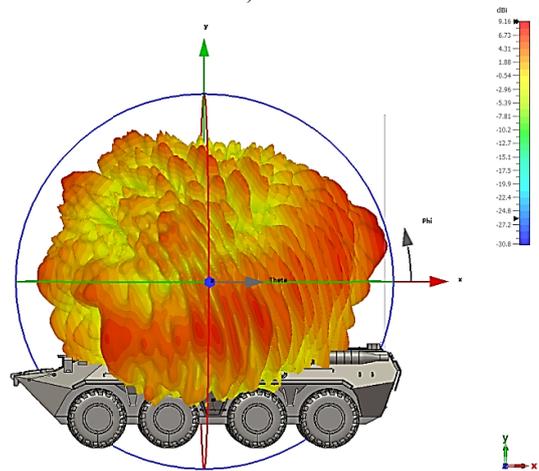


Рис. 8. Расположение СВЧ-антенны

Проведен анализ диаграммы направленности. Результаты анализа представлены на рис. 9.



а)



б)

Рис. 9. Диаграмма направленности СВЧ-антенны на носителе

По результатам моделирования диаграммы направленности можно сделать вывод о том, что возникают паразитные лепестки из-за того, что длина волны короче и большие габариты корпуса носителя. Проведён анализ трассировки лучей, представленный на рис. 10.

Моделирование показало, что СВЧ-антенна, работающая на еще более высоких частотах, сильнее подвержена переотражениям по сравнению с предыдущими.

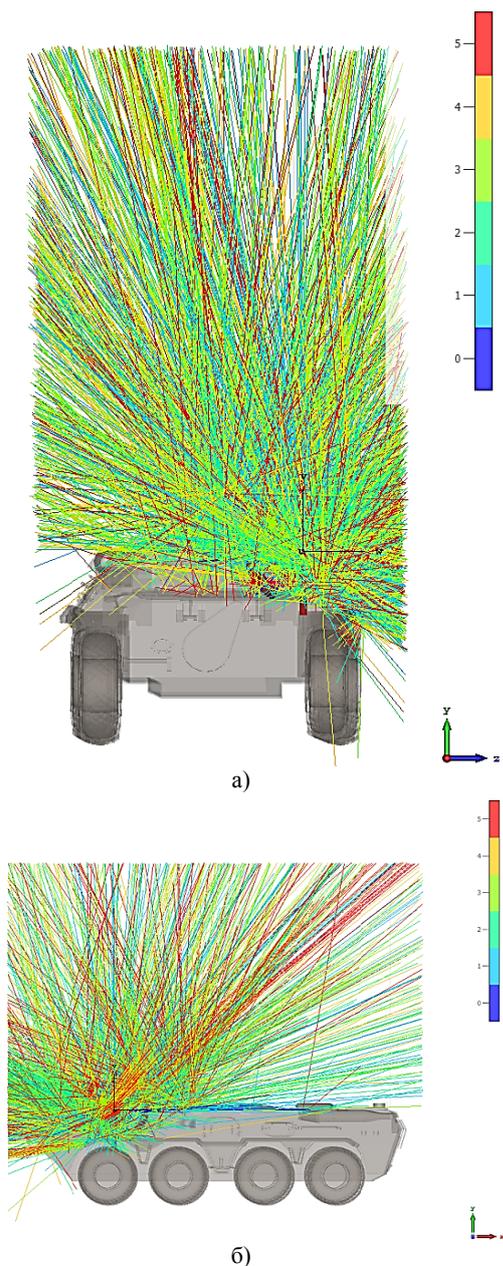


Рис. 10. Трассировка лучей СВЧ-антенны на носителе

В связи с тем, что результаты моделирования СВЧ-антенны были неудовлетворительными, было принято решение изменить её положение на башню орудия (самая высокая точка) (рис. 11).

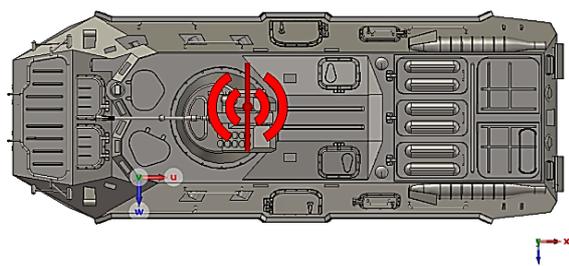


Рис. 11. Измененное расположение СВЧ-антенны

Был проведен анализ диаграммы направленности. Результаты анализа представлены на рис. 12.

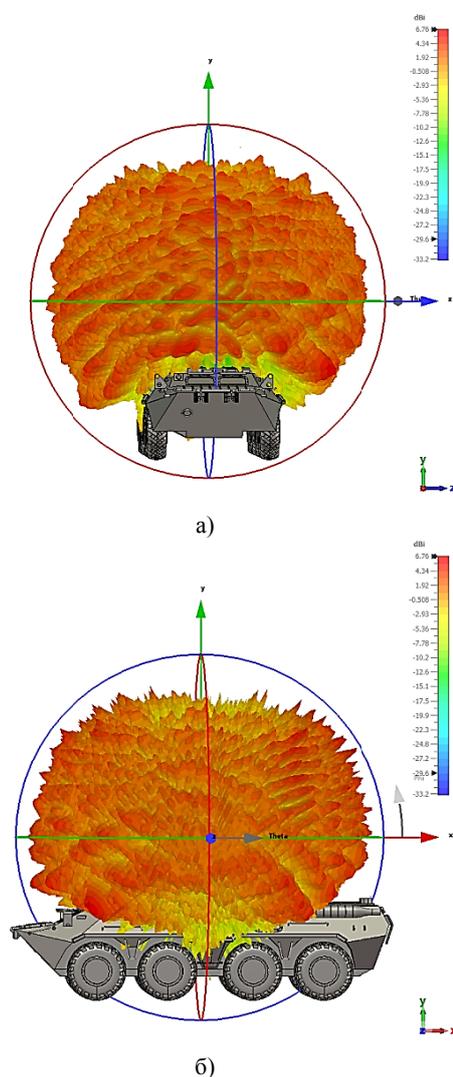


Рис. 12. Диаграмма направленности СВЧ-антенны на носителе

По результатам моделирования диаграммы направленности можно сделать вывод о том, что от паразитных лепестков избавиться не удалось, что формирует более лучшую всенаправленность.

Проведён анализ трассировки лучей, представленных на рис. 13.

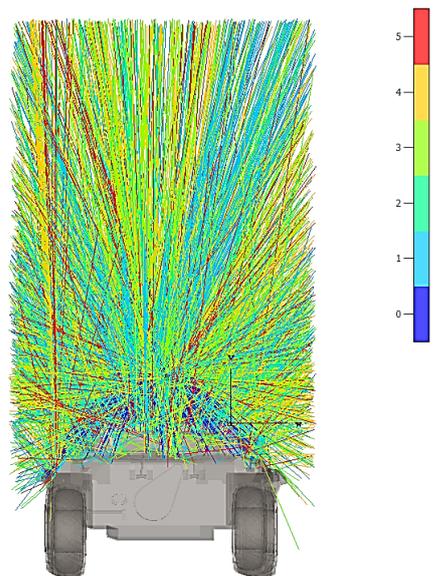
Моделирование показало, что удалось достичь наиболее лучшую трассировку лучей (синие лучи не переотражаются вовсе).

Заключение

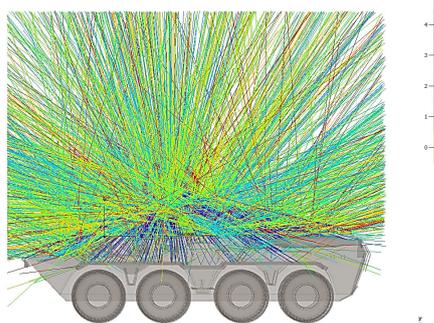
В ходе проведенного исследования было выявлено, что расположение антенных систем на транспортных средствах (в данном случае БТР-80) является важным и решающим для обеспечения эффективной связи. Из-за того, что данное транспортное средство в большей степени изготавливается из металлов, возникают паразитные свойства. Оптимальным местом для установки КВ/УКВ-антенн является задняя часть бронетранспортёра, причём чем ближе к краю, тем оптимальнее будет качество связи. Все исследованные антенны показали согласование в заданных полосах частот, что подтверждает их применимость не только для монохроматических сигналов, но и для реальных широкополосных систем связи.

Литература

1. Rütshlin M., Tallini D. Simulation for antenna design and placement in vehicles // *Antennas, Propagation & RF Technology for Transport and Autonomous Platforms 2017*. Birmingham, 2017. Pp. 1-5.
2. Antenna Placement Optimization for Vehicle-to-Vehicle Communications / E. Whalen, A. Elfrgani, C. Reddy, R. Rajan // *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Boston, MA, USA. 2018. Pp. 1673-1674.
3. Ignatenko M., Filipovic D.S. Evaluation of Vehicle Bottom for the Placement of HF-VHF Antennas // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Feb. 2015. Vol. 63. No. 2. Pp. 776-781.
4. Combining Measurement with Simulation for Automotive Antenna Placement and EMC Analysis / P.W. Futter, L. Scialacqua, L.J. Foged, J. Soler // *2018 IEEE 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*, Stellenbosch, South Africa. 2018. Pp. 1-4.
5. Effects of Antenna Characteristics and Placements on a Vehicle-to-Vehicle Channel Scenario / D. Kornek [et al.] // *2010 IEEE International Conference on Communications Workshops*, Cape Town, South Africa. 2010. Pp. 1-5.
6. Influence of single and multiple antenna placements on the capacity of C2C communication systems / L. Reichardt, T. Mahler, T. Schipper, T. Zwick // *2013 European Microwave Conference*, Nuremberg, Germany, 2013. Pp. 720-723.
7. Effect of Antenna Placement and Diversity on Vehicular Network Communications / S. Kaul [et al.] // *2007 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, San Diego, CA, USA, 2007. Pp. 112-121.
8. Automotive Antenna Performance and Simulation / L. Low, R. Langley, R. Breden, P. Callaghan // *2006 First European Conference on Antennas and Propagation*, Nice, France, 2006. Pp. 1-4.
9. Richie J.E., Koch B.R. The use of side-mounted loop antennas on platforms to obtain nearly omnidirectional radiation // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Dec. 2005. Vol. 53. No. 12. Pp. 3915-3919.



а)



б)

Рис. 13. Трассировка лучей СВЧ-антенны на носителе

По результатам исследований, проведенных выше, можно сделать вывод, что наиболее оптимальное расположение антенн представлено на рис. 14.

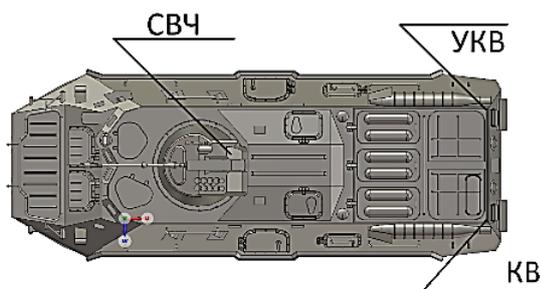


Рис. 14. Наиболее оптимальное расположение антенных систем

Информация об авторах

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, ассистент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (473) 243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Медведев Александр Евгеньевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (473) 243-77-29, e-mail: medvedev.vzломhik1999@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4358-935X>

Скрбнев Александр Иванович – преподаватель Военного учебного центра, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (473) 246-26-79, e-mail: skrebnev@cchgeu.ru

Силонов Алексей Анатольевич – преподаватель Военного учебного центра, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (473) 246-26-79, e-mail: silonovaleksei@mail.ru

Сукачев Александр Игоревич – старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (473) 243-77-29, e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

Сафонов Иван Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (903) 654-78-26, e-mail: saff@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-4770>

OPTIMIZATION OF LOCATING ANTENNA SYSTEMS ON AN ARMORED PERSONNEL CARRIER USING ELECTRODYNAMIC MODELING METHODS

E.A. Ishchenko, A.E. Medvedev, A.I. Skrebnev, A.A. Silonov, A.I. Sukachev, I.A. Safonov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers the problem of optimizing the placement of antenna systems on an armored personnel carrier BTR-80 using electrodynamic modeling methods. We studied the characteristics of the antennas of various ranges (HF, VHF, microwave), taking into account the influence of the metal body of the vehicle. We carried out computer modeling in the CST Studio Suite software complex, including an analysis of the orientation and trace charts of rays. The results showed that the optimal arrangement of the antennas, especially in the rear of the case, minimizes the signal from the signal and provides a stable relationship. For HF antennas (15 MHz), the best results were achieved when placed on the roof, while the VHF (433 MHz) shows stable operation when installing on the side parts of the case. The microwave-antenna (2.4 GHz) showed the best characteristics when placing the guns on the tower, which allowed one to reduce the influence of parasitic petals. We confirmed high modeling accuracy by comparison with experimental data. The study emphasizes the importance of taking into account the frequency features and geometry of the corps in the design of antenna systems for military equipment. The results of the work can be applied to improve the quality of communication and reduce interference in conditions of limited space and complex electromagnetic situation

Key words: antenna systems, armored personnel carrier, electrodynamic modeling, CST Studio Suite, radiation pattern, ray tracing, HF antenna, VHF antenna, microwave antenna, signal reflection

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment «Youth Laboratory» no. FZGM-2024-0003

References

1. Rütshlin M., Tallini D. “Simulation for antenna design and placement in vehicles”, *Antennas, Propagation & RF Technology for Transport and Autonomous Platforms 2017*, Birmingham, 2017, pp. 1-5.
2. Whalen E., Elfrgani A., Reddy C., Rajan R. “Antenna placement optimization for vehicle-to-vehicle communications”, *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Boston, MA, USA, 2018, pp. 1673-1674.
3. Ignatenko M., Filipovic D.S. “Evaluation of vehicle bottom for the placement of HF-VHF antennas”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Feb. 2015, vol. 63, no. 2, pp. 776-781.
4. Futter P.W., Scialacqua L., Foged L.J., Soler J. “Combining measurement with simulation for automotive antenna placement and EMC analysis”, *2018 IEEE 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*, Stellenbosch, South Africa, 2018, pp. 1-4.
5. Kornek D., Schack M., Slottke E., Klemp O., Rolfes I., Kürner T. “Effects of antenna characteristics and placements on a vehicle-to-vehicle channel scenario”, *2010 IEEE International Conference on Communications Workshops*, Cape Town, South Africa, 2010, pp. 1-5.
6. Reichardt L., Mahler T., Schipper T., Zwick T. “Influence of single and multiple antenna placements on the capacity of C2C communication systems”, *2013 European Microwave Conference*, Nuremberg, Germany, 2013, pp. 720-723.
7. Kaul S. et al. “Effect of antenna placement and diversity on vehicular network communications”, *2007 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, San Diego, CA, USA, 2007, pp. 112-121.

8. Low L., Langley R., Breden R., Callaghan P. "Automotive antenna performance and simulation", *2006 First European Conference on Antennas and Propagation*, Nice, France, 2006, pp. 1-4.
9. Richie J.E., Koch B.R. "The use of side-mounted loop antennas on platforms to obtain nearly omnidirectional radiation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Dec. 2005, vol. 53, no. 12, pp. 3915-3919.

Submitted 21.05.2025; revised 30.06.2025

Information about the authors

Evgeniy A. Ishchenko, graduate student, Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Aleksandr E. Medvedev, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: medvedev.vzломhik1999@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4358-935X>

Aleksandr I. Skrebnev, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)246-26-79, e-mail: skrebnev@cchgeu.ru

Aleksey A. Silonov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)246-26-79, e-mail: silonovaleksei@mail.ru

Aleksandr I. Sukachev, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

Ivan A. Safonov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(903)654-78-26, e-mail: saff@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-4770>

ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМЫ ДВОЙНОГО ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

И.С. Бобылкин, В.А. Ванин, Е.М. Ивашкина, А.М. Безрукавый, А.В. Муратов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в настоящее время, в более широком смысле, радиочастотные/микроволновые приложения можно отнести к таким средствам, как связь, радиолокация, навигация, радиоастрономия, зондирование, медицинское приборостроение и другие, которые рассматривают частотные спектры на диапазоне, например, от 300 кГц до 300 ГГц. Традиционные схемы повышающих преобразователей зачастую не способны обеспечить необходимые характеристики по уровню выходного напряжения, коэффициенту полезного действия (КПД) и динамическим показателям в современных приложениях. С учётом всех требований и спецификаций сами конструкции фильтров можно изменить следующим образом: схемы, в которых используются сосредоточенные или распределенные определенным образом элементы, можно интегрировать в различные структуры линий передачи. Таковыми являются волновод, коаксиальная или микрополосковая линии. Тем временем начали появляться достижения в области средств автоматизированного проектирования (САПР), таких как полноволновые электромагнитные симуляторы (ЭМ), которые смогли произвести революцию в дизайне фильтров. Были проведены работы по проведению модуляции множества новых типов микрополосковых фильтров с имеющимися улучшенными фильтрующими характеристиками. Полученные результаты могут найти применение при разработке современных источников питания повышенной эффективности, что соответствует тенденциям развития силовой электроники и растущим требованиям к энергоэффективности современного оборудования

Ключевые слова: фильтр, сигнал, помехи, сверхвысокие частоты (СВЧ), высокие частоты (ВЧ), микрополосковая линия, приемное устройство

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Постановка задачи и методы исследований

Наибольшее количество ВЧ/СВЧ-фильтров и фильтрующих компонентов можно рассмотреть в виде двухпортовой сети, как указано на рис. 1, где использующиеся V_1 , V_2 и I_1 , I_2 являются переменными величинами по напряжению и току для расположенных портов 1 и 2 соответственно. В данном случае Z_{01} и Z_{02} — сопротивления клемм, а E_s представляет собой источник или же напряжение существующего генератора. Используемые переменные значения являются комплексными амплитудами, когда нужно рассмотреть синусоидальные величины.



Рис. 1. Двухпортовая сеть, учитывающая сетевые переменные

Как пример, синусоидальное напряжение на порту 1 можно задать следующей формулой:

$$v_1(t) = |V_1| \cos(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

После этого можно также произвести преобразования:

$$v_1(t) = |V_1| \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re}(|V_1| e^{j(\omega t + \varphi)}) = \operatorname{Re}(V_1 e^{j\omega t}), \quad (2)$$

где Re обозначает «действительную часть» выражения, которое следует за ним. Из этого следует, что можно определить комплексную амплитуду V_1 с помощью:

$$V_1 = |V_1| e^{j\varphi}. \quad (3)$$

Из-за трудностей измерения напряжения и тока для микроволновых частот было принято решение о введении новых волновых переменных для уравнения. А именно, a_1 , b_1 и a_2 , b_2 , где a используется для указания падающих волн, а b — для отраженных волн. Все взаимосвязи между волновыми переменными и переменными напряжения и тока определяются как:

$$V_n = \sqrt{Z_{0n}}(a_n + b_n), \quad (4)$$

где $N=1$ и 2 ,

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_{on}}} (a_n - b_n). \quad (5)$$

Указанные выше формулы определяют, что питание на порту n выражается следующим видом:

$$P_n = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(V_n \cdot I_n^*) = \frac{1}{2} (a_n a_n^* - b_n b_n^*), \quad (6)$$

где звездочка, в данном случае, определяет сопряженную величину. Можно распознать, что $a_n a_n^*$ — мощность падающей волны, а $b_n b_n^*/2$ — мощность отраженной волны в порту n .

Применение каскадного соединения двух или более простых сетей наиболее часто рассматривается при анализе и проектировании фильтров. Это обусловлено тем, что у большей части фильтров в состав входят каскадные двухпортовые компоненты. Для наглядности рассмотрим в качестве примера сеть, образованную каскадным соединением двух подсетей, как представлено на рис. 2, в. Для него существующие соотношения напряжения и тока на клеммах составной сети были бы очевидны:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_2'' \\ I_2'' \end{bmatrix}. \quad (7)$$

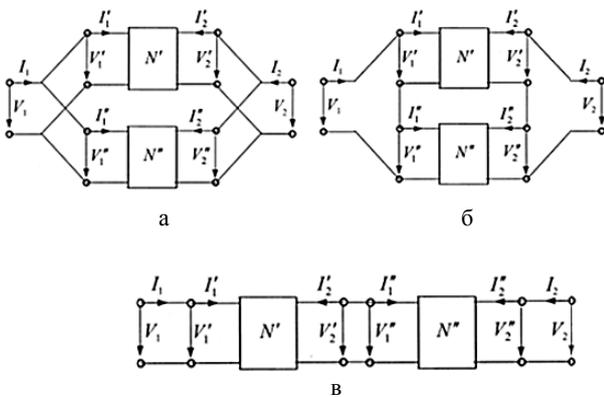


Рис. 2. Основные типы сетевых подключений: (а) параллельное, (б) последовательное и (в) каскадное

Обычной практикой является применение синтеза управляющих сигналов с задействованием IQ-модуляции, для которой требуется калибровка синфазного (I) и квадратурного (Q) сигналов наряду с двумя смещениями постоянного тока для генерации чистых тонов.

Для проведения анализов физическая схема данного вида была спроектирована с помощью применения стандартных методов проектирования печатных плат для микрополосковых фильтров и двух обычных радиочастотных смесителей. После этого выбранная схема была использована для успешного управления сверхпроводящим

трансмон-кубитом. При воспроизведении надлежащего радиочастотного экранирования были достигнуты звуковые сигналы кубита с динамическим диапазоном без возникающих помех более 70 дБ по всему рабочему спектру кубита трансмона. Это тип сверхпроводящего зарядового кубита, который был разработан для уменьшения чувствительности к зарядовому шуму. Сверхпроводящие кубиты являются основой многообещающей аппаратной платформы для воссоздания квантовых компьютеров.

Подобные приборы используют микроволновые частоты с произвольными формами сигналов. В основном синтезом для управляющих сигналов является возможность использования IQ-модуляции, повышающего преобразование управляющего импульса с его синтезированной частоты на частоту кубита.

Применение IQ-модуляции для управления кубитами позволяет достичь использования множества параметров: два канала AWG, два канала постоянного тока и один канал LO. Достижимым преимуществом преобразования IQ-модуляции с повышением частоты является диапазон частот, на которых могут синтезироваться сигналы.

Полученные результаты указывают на то, что метод двойного преобразования с повышением, реализованный с помощью модуля с одним кубитом, смог успешно вызвать вращение состояния кубита по оси x вокруг сферы Блоха. Результаты этого эксперимента позволяют достичь возможности откалибровать управляющие импульсы на основе амплитуд возбуждения, необходимых для поворота вектора состояния вокруг оси x на определенную величину.

Практическая часть

Для достижения показательной оценки производительности схем были проанализированы спектры мощности после каждого этапа повышающего преобразования. На рис. 3 и 4 соответственно были отмечены спектры после первой и второй стадий повышающего преобразования. Установка, применяемая для отслеживания этих спектров, состояла из 3 радиочастотных источников, предоставленных WindFreak Synth HD Pro (версия 2); один для входного IF и два для the LOst ages. Мощность этих источников была зафиксирована на 10 дБм. Источник входного сигнала настраивался на 450 МГц, при этом первый и второй LO были установлены на 3,35 ГГц и 7,926 ГГц соответственно.

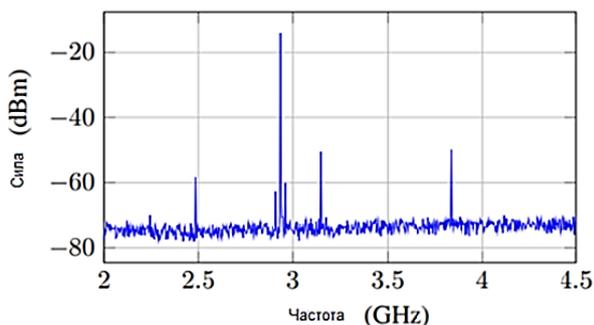


Рис. 3. Измеренный спектр после первого повышающего преобразования

Желаемый сигнал заметен на частоте 2,9 ГГц. Некоторые паразитные пики находятся вокруг желаемой боковой полосы. RBW для измерений устанавливается равным 1 МГц. Мощность всех источников была настроена на 10 дБм. Входной источник был использован на значении в 450 МГц, при этом первый и второй LO были зафиксированы на 3,35 ГГц и 7,926 ГГц соответственно.

На рис. 3 желаемый сигнал боковой полосы с повышающим преобразованием располагается на частоте 2,9 ГГц. Анализ данного спектра помог выявить ограничивающий фактор схемы, введенный фильтром первой ступени. Процесс микширования второй ступени также преобразует ослабленный сигнал LO первой ступени и нежелательную боковую полосу в желаемый сигнал IF. Беря во внимание, что все эти сигналы приблизительно схожи по частоте, в большинстве случаев все они будут располагаться в полосе пропускания фильтра второй ступени. Также следует отметить, что на рис. 3 присутствуют нежелательные спектральные пики в нижней части желаемой боковой полосы.

Справа от желаемого сигнала заметны ослабленные нижняя и верхняя боковые полосы первого каскадного повышающего преобразования.

На рис. 4 рассмотрен выходной сигнал схемы двойного повышающего преобразования.

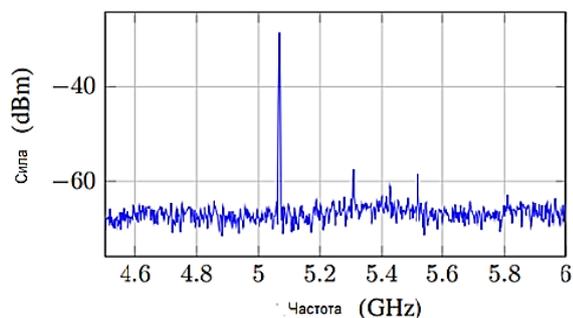


Рис. 4. Измеренный спектр на выходе схемы двойного повышающего преобразования

Как описывалось ранее, понижение нежелательной боковой полосы первого вида и первой ступени является результатом процесса фильтрации первой ступени, так как оба спектральных пика находятся в этом сигнале. В данном случае минимальное расстояние между желаемым и нежелательным сигналом составляет приблизительно 30 дБ.

Причиной такой разницы в расстояниях между первым и вторым повышающим преобразованием может являться различие в откате фильтра второй ступени. Спектры, рассмотренные на рис. 3 и 4, выявляют сильное разделение между желаемыми частотами и нежелательными спектральными пиками.

Для достоверности данных были проведены дополнительные измерения из 4 идентичных схем для оценки воспроизводимости. Для оценки производительности мы воспользовались децибелами относительно желаемого сигнала. Один пример спектра, который был получен в дополнительном опыте в процессе измерения, отображен на рис. 5. На графике показаны ограничения ослабления первого фильтра, поскольку LO1 и нежелательная боковая полоса первого каскада еще присутствуют в сигнале. Также стоит отметить, что второй сигнал LO демонстрирует значительную мощность, несмотря на ожидаемое ослабление второго фильтра. Измерение dBc в этом случае будет ссылаться на второй сигнал LO, поскольку это второй по мощности сигнал [2].

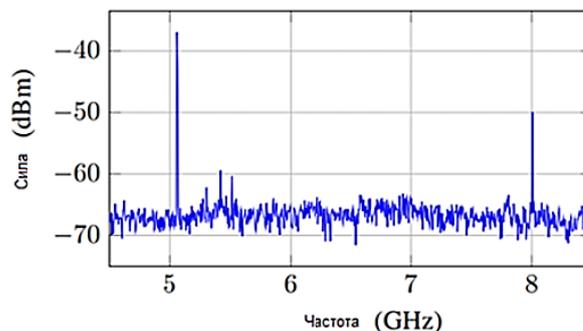


Рис. 5. Спектр, используемый для вычисления dBc

Все измерения проводились с применением управляющего сигнала AWG, установленным на частоту 450 МГц. Первый LO был установлен на 3,35 ГГц, чтобы поместить сигнал возбуждения на частоте 2,9 ГГц в полосу пропускания фильтра первой ступени. Радиочастотные источники WindFreak применялись как для входов LO, так и для репрезентативного сигнала возбуждения IF. Они были настроены

на мощность 10 дБм. Затем dVc был записан в диапазоне частот, которые находятся в полосе пропускания фильтра второй ступени, путем сдвига частоты второго LO. Результаты представлены на рис. 6.

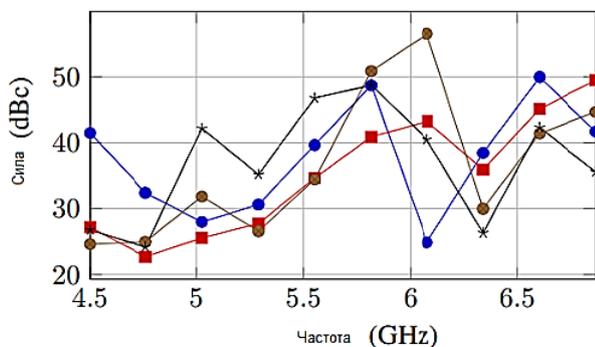


Рис. 6. Измерения dVc нескольких схем двойного повышающего преобразования

Существуют измерения dVc, появившиеся между повышающими преобразованными управляющими сигналами и LO второго каскада в диапазоне частот в полосе пропускания фильтра второго каскада. Информация на рис. 6 показала, что большинство измерений схем двойного повышающего преобразования находится в пределах установленного диапазона, при этом некоторые определенные частоты демонстрируют худшую производительность, а другие — превосходство по затуханию модуляции IQ.

Заключение

Применение схемы двойного повышающего преобразования позволяет достигнуть варианта недорогой альтернативы для создания радиочастотных сигналов с частотами, необходи-

мыми для управления сверхпроводящими кубитами. Производство микрополосковых фильтров на стандартизированной печатной плате оказалось возможным для фильтрации нежелательных аспектов каждого процесса повышающего преобразования в рамках схемы. Несмотря на демонстрацию успешного управления кубитами с производительностью, эквивалентной обычной модуляции IQ, существуют значительные улучшения, которые могут быть сделаны для достижения большей надежности управления: специальная оптимизация отката фильтра и защита компонентов схемы от перекрестных радиочастотных помех. Тем не менее, схема более масштабируема, чем IQ-модуляция, с точки зрения стоимости, поскольку для каждого кубита теперь требуется только один дорогостоящий AWG-выход (в отличие от двух в IQ-модуляции) при компромиссе с двумя (более дешевыми) радиочастотными источниками для входов LO вместо одного.

Также мы смогли указать на то, что при использовании надлежащего экранирования существующие тональные сигналы кубита могут генерироваться с частотой более 70 дБ динамического диапазона без помех во всем диапазоне рабочих частот передающего кубита [3].

Литература

1. Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: пер. с англ.; под общ. ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнира. М.: Связь, 1971. 438 с.
2. Дирлав Дж., Паккиам П., Федоров А. Двойное повышающее преобразование для сверхпроводящего кубита. Управление реализовано с использованием микрополосковых фильтров. М.: Центр передового опыта в области инженерных квантовых систем, Квинслендский университет, Сент-Люсия Австралия, 2022. 9 с.
3. Конструирование и расчет полосковых устройств; под ред. И.С. Ковалева. М.: Советское радио, 1974. 295 с.

Поступила 10.04.2025; принята к публикации 30.05.2025

Информация об авторах

Бобылкин Игорь Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bobytkin@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>

Ванин Вячеслав Андреевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sentipidexyz@mail.ru

Ивашкина Екатерина Михайловна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kattya.ivashk-ina@yandex.ru

Безрукавый Артем Михайлович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: artivirus07@mail.ru

Муратов Александр Васильевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: MuratovAlexanderVasilievich@yandex.ru

APPLICATION OF THE DOUBLE BOOST CONVERSION SCHEME

I.S. Bobylkin, V.A. Vanin, E.M. Ivashkina, A.M. Bezrukavy, A.V. Muratov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: currently, in a broader sense, radio-frequency/microwave applications can be attributed to such means as communication, radar, navigation, radioastronomy, sounding, medical instrumentation and others that consider frequency spectra on the range, for example, from 300 kHz to 300 GHz. Traditional circuits of raising converters are often not able to provide the necessary characteristics in terms of output voltage, utility coefficient (efficiency) and dynamic indicators in modern applications. Given all the requirements and specifications, the filter designs themselves can be changed as follows: schemes in which the elements concentrated or distributed in a certain way can be integrated into various structures of the transmission lines. Such is a waveguide, or a coaxial line or a microbe. Meanwhile, achievements began to appear in the field of automated design (CAD), such as full -wave electromagnetic simulators (EM), which were able to revolution in the design of the filters. Work was carried out to carry out modulation of many new types of microbe filters with existing improved filter characteristics. The results can be used in the development of modern power sources of increased efficiency, which corresponds to the development trends of power electronics and the growing requirements for the energy efficiency of modern equipment

Key words: filter, signal, interference, super high frequency (SHF), high frequency (HF), microstrip, receiving device

Acknowledgements: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. Matthey G.L., Yang L., Jones E.M.T. "Microwave filters, matching circuits and communication circuits" ("Fil'try SVCH, soglasuyushchiye tsepi i tsepi svyazi"), Moscow: Svyaz', 1971, 438 p.
2. Dirlav J., Pakkiam P., Fedorov A. "Double step-up conversion for a superconducting qubit. The control is implemented using microstrip filters", Center of Excellence in the Field of Engineering Quantum Systems, University of Queensland, Saint Lucia Australia, 2022, 9 p.
3. Kovalev I.S. ed. "Design and calculation of strip devices" ("Konstruirovaniye i raschet poloskovykh ustroystv"), Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 295 p.

Submitted 10.04.2025; revised 30.05.2025

Information about the authors

Igor' S. Bobylkin, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bobytkin@bk.ru , ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>
Vyacheslav A. Vanin, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sentipidexyz@mail.ru
Ekaterina M. Ivashkina, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: katya.ivashkina@yandex.ru
Artyem M. Bezrukavy, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: artivirus07@mail.ru
Aleksandr V. Muratov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: MuratovAlexanderVasilievich@yandex.ru

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ
РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН****Ю.Г. Пастернак, Д.В. Пацев, И.А. Сафонов, Е.А. Ищенко, Д.К. Проскурин, А.И. Сукачев****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: проводится оценка волнового сопротивления в ближней зоне рассеяния. В качестве исследуемых моделей были использованы тела, имеющие простые геометрические параметры. В каждом случае производилась оценка волнового сопротивления. В качестве модели был взят высокомобильный роботизированный автономный комплекс, корпус которого выполнен из материалов с разной степенью проницаемости электромагнитных волн – из диэлектрика и из идеального проводника (РЕС). Исследование волнового сопротивления выявило доминирование электрического механизма рассеяния в ближней зоне. Различия в геометрии исследуемых образцов привели к неоднородным результатам. Это наблюдалось в некотором разбросе пиковых значений волнового сопротивления и частот, на которых они возникают. Экспериментальные данные позволяют количественно оценить степень деформации электрической компоненты ЭМ-поля (электромагнитного поля) под внешним воздействием. Систематизация полученных результатов создает основу для совершенствования методов подавления паразитных наводок и проектирования эффективных рассеивающих элементов. В случае с роботизированным автономным комплексом данное исследование позволит сформировать оптимальную геометрию корпуса и подобрать подходящие материалы, чтобы избежать потерь электромагнитных волн, а также разместить устройства определения характеристик электромагнитных волн

Ключевые слова: электрический тип рассеяния волн, волновое сопротивление, электромагнитное моделирование

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003

Введение

Анализ особенностей рассеяния электромагнитных волн в ближней зоне (NF) методами электродинамического моделирования представляет значительный научный и практический интерес, особенно при проектировании радиопеленгационных систем. Ключевая проблема заключается в том, что:

1. При доминировании электрического типа отражения наблюдаются существенные искажения электрических компонент поля.

2. При изменении волнового сопротивления в ближней зоне наибольшие помехи возникают в магнитной составляющей поля.

Эти особенности обуславливают необходимость детального исследования пространственного распределения полевых характеристик вблизи рассеивающих объектов. Современные методы электромагнитного моделирования позволяют с высокой точностью определить особенности формирования ближнего поля, характер распределения волновых сопротивлений, тип преобладающего отражения (электрическое или магнитное).

Определение типа волнового отражения требует комплексного анализа распределения волновых сопротивлений, что может быть эффективно выполнено с применением методов электродинамического моделирования. Такой подход обеспечивает получение достоверных данных о параметрах рассеяния, критически важных для разработки радиотехнических систем.

В работе исследуется метод создания виртуальной антенной решетки с использованием магнитных диполей [1]. Анализируются два подхода к пеленгации – по электрическому и магнитному полю. Результаты исследования показали, что применение магнитных диполей существенно улучшает устойчивость и точность определения направления как для линейно, так и для эллиптически поляризованных электромагнитных волн. Приведены ключевые математические формулы для расчета пеленгационных характеристик, а также графики зависимости пеленгов в изучаемом частотном диапазоне. Разработанный в статье метод формирования виртуальных магнитных диполей демонстрирует значительное повышение точности пеленгации электромагнитных волн в сравнении с методами, основанными на электрических компонентах поля.

Трехмерный полуаналитический алгоритм согласования мод (SAMM) используется для определения ближнего поля рассеяния от подземных целей в потерянной почве, где источником является диполь, размещенный в скважине в земле [2]. Метод основан на представлении рассеянного поля в виде суперпозиции сферических мод низкого порядка с центрами рассеяния (CSC), заданными в произвольных точках. Коэффициенты мод определяются численно методом наименьших квадратов, обеспечивая выполнение граничных условий в дискретных точках раздела сред и соблюдение условий излучения. Для проверки точности алгоритма SAMM его результаты сравниваются с данными, полученными методом приближения Борна для полупространства (HSBA). Наблюдаемое хорошее соответствие результатов подтверждает корректность предложенного подхода.

В исследовании [3] рассматривается методика восстановления поля рассеяния радиолокационной цели на основе модели центров рассеяния. Основная идея заключается в формировании базы данных таких центров с использованием ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar)-изображений и алгоритма CLEAN. На следующем этапе, применяя данные из этой базы и методы теории восстановления поля, авторы реконструируют поле рассеяния для модифицированной радиолокационной цели. Для демонстрации эффективности подхода анализируется характерная геометрическая конфигурация. Результаты показывают, что восстановленное поле рассеяния обеспечивает высокую точность аппроксимации реального поля в частотно-пространственной области, что подтверждает практическую применимость метода. Данный подход особенно важен для моделирования рассеянного поля крупногабаритных радиолокационных объектов, где прямое измерение может быть затруднено.

В работе [4] представлен метод расчета рассеянных ближних полей от электрически крупных объектов с идеальной электропроводностью (ПЕС) при их облучении антенными источниками дальнего поля. В основе подхода лежит комбинация метода стрельбы и отражения лучей (SBR) с интегральным представлением ближнего поля в рамках физической оптики (ПО). Для повышения вычислительной эффективности интегральные выражения ПО преобразуются в замкнутые аналитические формы с использованием локальных аппроксимаций функции Грина. Такой подход позволяет применять метод SBR для точного анализа ближ-

него поля рассеяния от ПЕС-объектов при произвольных углах падения излучения дальнего поля. Приведенный численный пример подтверждает высокую точность и эффективность предложенной методики. Разработанный подход особенно полезен для решения задач анализа ближнего поля рассеяния сложных электродинамических структур.

В исследовании [5] разработан подход к расчету рассеянного электромагнитного поля для объектов простой геометрической формы, покрытых радиопоглощающими материалами. Методика позволяет определять эффективную площадь рассеяния (ЭПР) и анализировать переходные характеристики для таких объектов, как цилиндр и составной конус.

Для верификации метода выполнено сравнение:

1. С данными натуральных экспериментов.
2. С результатами численного моделирования в широко применяемом электромагнитном решателе FEKO.

Проведенные сопоставления подтверждают достоверность предложенного расчетного подхода. Разработанная методика может быть полезна при проектировании радиопоглощающих покрытий и анализе характеристик рассеяния объектов. Особую ценность метод представляет для быстрой оценки ЭПР объектов простой формы на этапе предварительных расчетов.

В исследовании [6] предложена компактная измерительная установка, размещенная в безэховой камере, для анализа характеристик радиопоглощающих материалов и измерения эффективной площади рассеяния (ЭПР) в частотном диапазоне 8-12 ГГц. Установка позволяет проводить испытания простых тестовых объектов, включая:

- сферы;
- плоские металлические пластины;
- линзы Люнеберга;
- двугранные уголкового отражатели;
- цилиндрические объекты.

Валидация методики выполнена на сертифицированной линзе Люнеберга с известным значением ЭПР 45 м², показавшая высокую степень соответствия с паспортными данными производителя. Для металлических тел различных геометрий проведены измерения угловых зависимостей обратного рассеяния в указанном частотном диапазоне. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами продемонстрировало хорошую сходимость результатов. Особое внимание уделено исследо-

ванию радиопоглощающих материалов, разработанных в ИАЕ. Измерения показали, что нанесение такого покрытия на цилиндрический образец существенно снижает величину ЭПР, изменяет угловые характеристики рассеяния, а также подтверждает эффективность предложенной методики для оценки радиопоглощающих свойств материалов. Представленный метод отличается простотой реализации и обеспечивает достоверные результаты, что делает его перспективным для лабораторных исследований характеристик рассеяния и разработки радиопоглощающих покрытий.

Исследование ближнего поля рассеяния вихревой электромагнитной волны на основе ФЕКО [7]. На основе полноволнового электромагнитного моделирования ФЕКО и принципа диагностики ближнего поля изучаются характеристики рассеяния в ближнем поле типичных рассеивателей, освещенных вихревыми электромагнитными волнами. Из данных моделирования показано, что способность идентификации характеристик рассеивателя вихревой электромагнитной волной выше. В дополнение к амплитудным и фазовым паттернам, паттерны модального спектра орбитального углового импульса (ОАМ) поля рассеяния также несут информацию о геометрической форме и материальных характеристиках. Применение модального спектра ОАМ поможет улучшить способность получения информации и обнаружения цели электромагнитной волны. Из приведенных выше примеров видно, что поле рассеяния различных целей, освещенных волной ОАМ, не только показывает пространственное распределение амплитуды и фазы, но и демонстрирует уникальные характеристики распределения в области модального спектра ОАМ. Благодаря взаимодействию между вихревой электромагнитной волной (ЭМВ) и целью можно получить больше информации о цели из эхо-сигнала, что обеспечивает новый технический способ обнаружения и распознавания цели.

Многочисленное рассеяние электромагнитных волн диэлектрическими сферами, расположенными в ближнем поле источника излучения [8]. Представлен анализ многократного рассеяния электромагнитных (ЭМ) волн двумя диэлектрическими сферическими сферами без потерь с радиусами больше длины волны, расположенными в ближнем поле источника излучения. Падающее поле выражается в терминах сферических векторных волновых функций (СВФ). Трансляционные и вращательные теоремы сложения используются для выражения СВФ па-

дающего поля в системе координат, связанной с диэлектрическим рассеивателем. Выполнены численные вычисления для получения амплитудных и фазовых картин полей, многократно рассеянных двумя диэлектрическими сферами без потерь, центры которых расположены на оси визирования и в поле открытого конца круглого цилиндрического волновода, возбужденного в его доминирующей моде. Численно рассчитанные результаты показывают хорошее согласие с измеренными результатами, полученными из систематического экспериментального исследования прямого рассеяния, выполненного в X-диапазоне. Представленный анализ и выполненные вычисления, несмотря на сделанные приближения, четко подтверждены хорошим согласием между представленными расчетными и измеренными результатами.

Анализ характеристик рассеяния в ближнем поле на основе высокочастотного метода [9]. Предложено приближение расширенной фазы ближнего поля, основанное на высокочастотном методе, для моделирования электромагнитного (ЭМ) рассеяния электрически большого размера интересующей цели в ближней зоне. Предложено приближение с локальными центрами расширения, основанное на сетчатых гранях, для представления сферического падения волны вместо традиционной однородной плоской волны, и используется связанная интегральная формулировка для уточнения более высокопорядковых образований рассеяния в ближней зоне. Некоторые анализы рассеяния ближнего поля и эффекта сдвига частоты Доплера цели исследуются для описания более сложных характеристик и явлений рассеяния по сравнению с обычными проблемами дальнего поля. Проблема ближнего поля сильно отличается от дальнего поля, поскольку на него легко влияют дальность и фаза радара, поэтому необходимы приближения более высокого порядка. Более того, множественные центры рассеяния и доплеровский сдвиг делают рассеяние ближнего поля более трудным, а колеблющаяся мощность приема и более высокая частота ошибок в битах усложняют проблемы ближнего поля. Поэтому еще необходимо больше работы для лучшего понимания ближнего поля.

Анализ ближнего поля рассеяния от сложных целей [10]. В данной статье представлен теоретический метод расчета и анализа ближнего поля рассеяния от некоторых простых и сложных целей с использованием высокочастотного приближения. При расчете эффективной площади рассеяния (ЭПР) ближнего поля неко-

торых простых и сложных целей на основе системы SCTE (рассеяние от сложных целей и сред) результаты показывают, что существует большая разница между ближним полем и дальним полем. И характеристики ближнего поля более сложны. Этот метод имеет практическую инженерную ценность в области прогнозирования электромагнитных помех (ЭМП) и электромагнитного рассеяния (ЭМР) и др.

В этой статье метод РО и метод Physical Equivalent Layer (PEL) (Физически Эквивалентный Слой) применяются для расчета ближнего и дальнего поля Electromagnetic Scattering (EMS) (электромагнитного рассеяния) от некоторых целей. Для объекта большого размера его можно разделить на множество ячеек очень малого размера для их расчета. Если разделенная ячейка достаточно мала, то некоторая точка вблизи цели цели может рассматриваться как находящаяся в дальнем поле этой ячейки. Тогда проблема ближнего поля EMS от объектов большого размера становится векторной суммой дальнего поля EMS от этих ячеек. Этот теоретический метод для вычисления Radar Cross-Section (RCS) (эффективной площади рассеяния) ближнего поля цели имеет практическую инженерную ценность в области электромагнитной совместимости (EMC), прогнозирования электромагнитных помех (EMI), распознавания целей, радиоэлектронной борьбы, точного наведения и EMS и др.

Результаты проведенных исследований подтверждают актуальность данной задачи. В первой части работы будут рассмотрены примитивные объемные тела. Следующим шагом

станет исследование ближней зоны рассеяния на примере роботизированного автономного комплекса.

Теоретическое обоснование электродинамического моделирования волнового сопротивления в ближней зоне рассеяния электромагнитных волн

В процессе моделирования малый объект, изготовленный из идеального проводника (ПЕС), помещался в центре оси координат. После этого были установлены пробники электрического и магнитного поля (E и H). Расстояние между ними и рассматриваемым объектом составляло 10, 20, 30, 40, 50, 60 мм. Следующим шагом стало облучение модели плоской электромагнитной волной, имеющей линейную поляризацию, амплитуду равную единице и нулевой фазовый сдвиг. С целью определения наиболее оптимальных характеристик рассеяния волна направлялась на основную плоскость. Так как теоретически волновое сопротивление свободного пространства: $Z_0 = E/H = 120\pi \approx 377$ Ом, основной целью было получение максимально близким к этим значениям. Тип рассеяния в данном случае определяется следующим образом: на электрический будет указывать то, что величина волнового сопротивления в ближней зоне превышает теоретические значения, если ниже – магнитный. Первым шагом станет моделирование без объекта в центре, результат приведен на рис. 1.

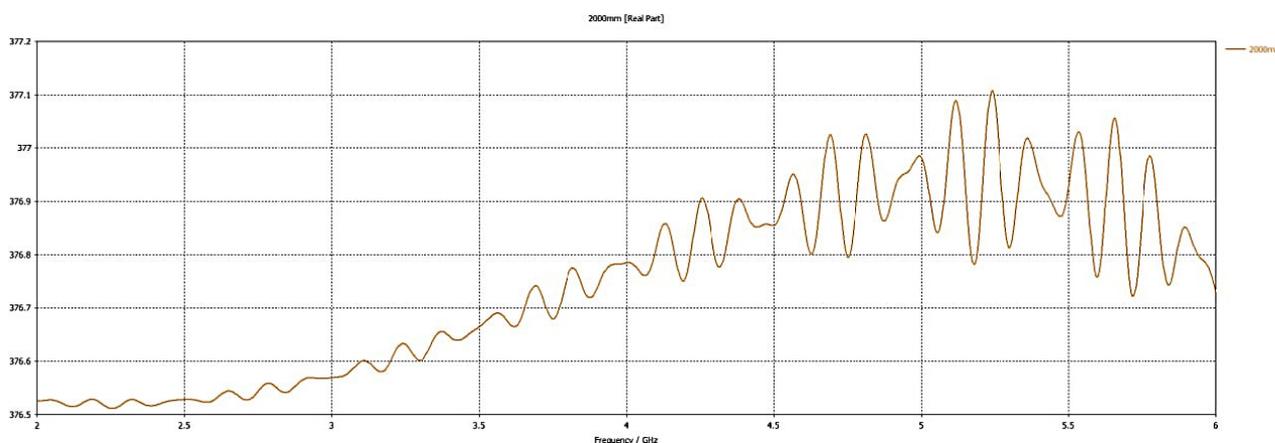


Рис. 1. Результаты моделирования волнового сопротивления свободного пространства без рассеивателей

Моделирование простых тел

Проведем моделирование фигуры кубической формы. Волна падает на плоскую грань (рис. 2).

Результаты моделирования приведены на рис. 3.

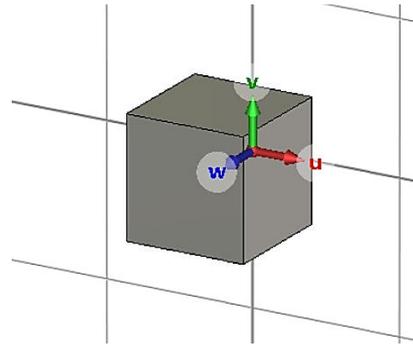


Рис. 2. Модель исследуемого тела (куб)

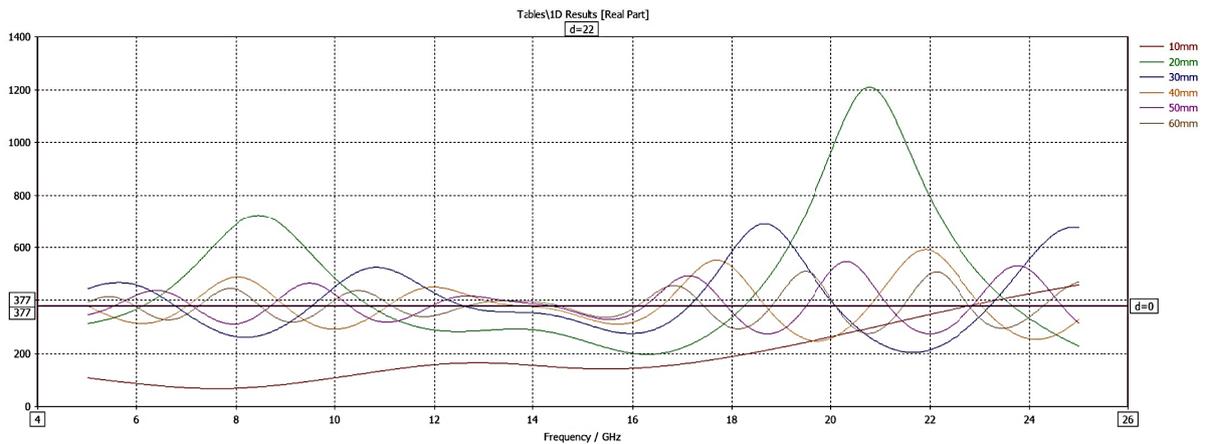


Рис. 3. Результаты моделирования волнового сопротивления простого тела (куб)

Анализ данного графика подтверждает преобладание электрического типа рассеяния в ближней зоне на частоте от 18 до 24 ГГц. Такие показатели обусловлены геометрическими особенностями исследуемой модели.

Далее перейдем к рассмотрению тела цилиндрической формы. В данном случае основной плоскостью падения волны является скругленная грань (рис. 4).

Результаты моделирования данного тела приведены на рис. 5.

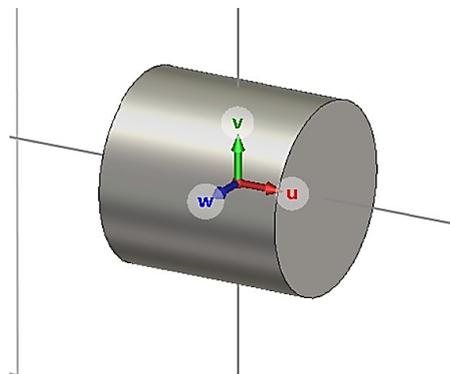


Рис. 4. Модель исследуемого тела (цилиндр)

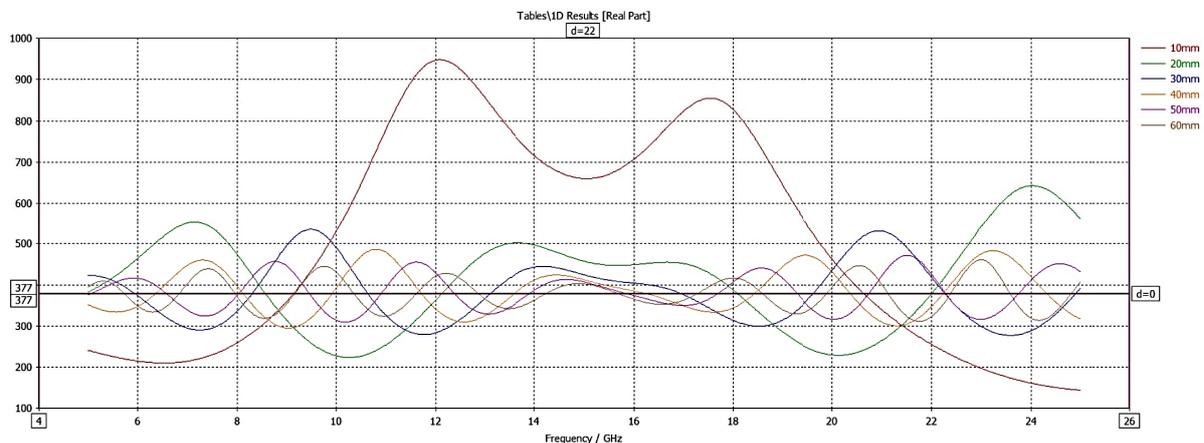


Рис. 5. Результаты моделирования волнового сопротивления простого тела (цилиндр)

Полученные данные указывают на преимущественно электрический тип рассеяния электромагнитных волн на частоте 9 – 21 ГГц. Подобные показатели могли стать результатом влияния геометрических особенностей цилиндрического тела.

В качестве следующей модели рассмотрим уголкового отражателя (рефлектор). Основная часть волны приходится на внутреннюю поверхность отражателя (рис. 6).

Результаты проведенного моделирования уголкового отражателя приведены на рис. 7.

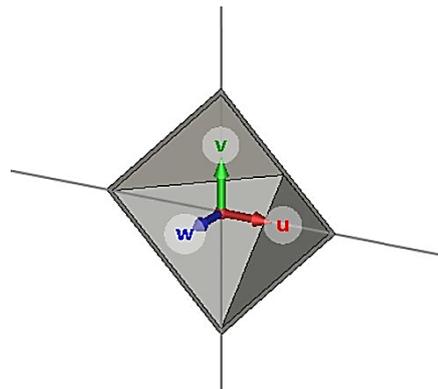


Рис. 6. Модель исследуемого тела (рефлектор)

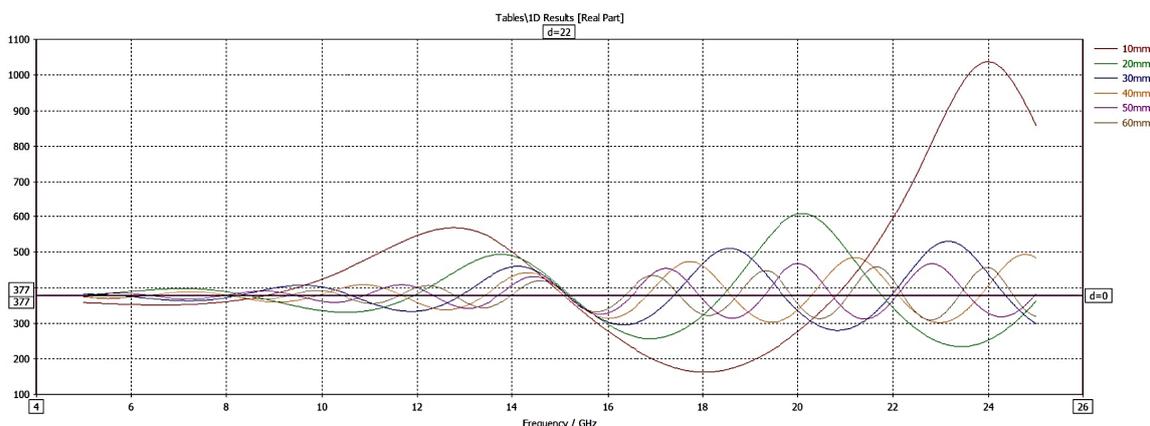


Рис. 7. Результаты моделирования волнового сопротивления рефлектора

На графике можно наблюдать электрический тип рассеяния, наибольшее волновое сопротивление было выявлено на частотах 21 – 26 ГГц. Существенное влияние на подобный результат оказала геометрическая форма уголкового отражателя.

Следующим этапом станет рассмотрение тела в форме сферы. Основная часть волны приходится на сферическую поверхность тела (рис. 8).

Результаты моделирования данного тела представлены на рис. 9.

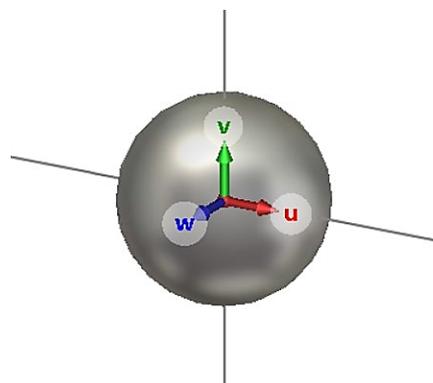


Рис. 8. Модель сферического тела

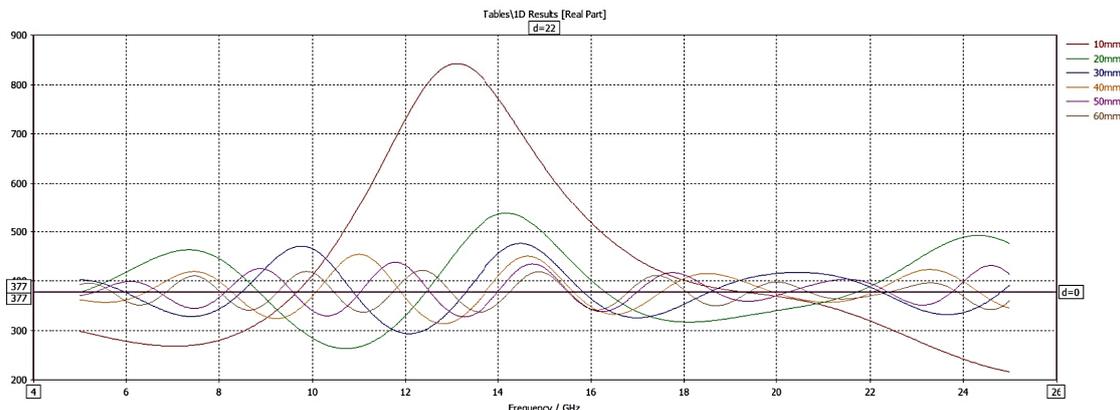


Рис. 9. Результаты моделирования волнового сопротивления сферического тела

Проведенный опыт свидетельствует о преобладании электрического типа рассеяния. Наибольшие показатели волнового сопротивления в ближней зоне наблюдаются на частоте 10 – 19 ГГц. Подобные результаты во многом являются следствием влияния геометрических параметров рассматриваемого тела.

Приступим к рассмотрению модели в форме тетраэдра. Волна в данном случае будет падать на острую грань исследуемого тела (рис. 10).

Результаты моделирования тетраэдра приведены на рис. 11.

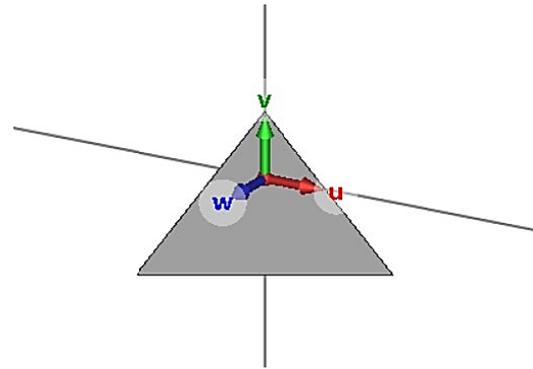


Рис. 10. Модель тетраэдра

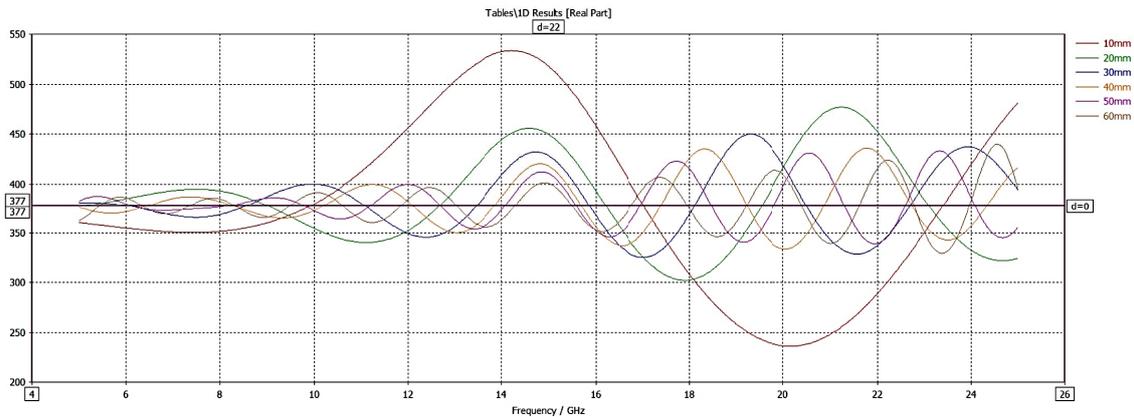


Рис. 11. Результаты моделирования волнового сопротивления тетраэдра

Полученные результаты исследования тетраэдрического тела указывают на преобладание магнитного типа рассеяния. Наибольшие показатели волнового сопротивления были выявлены на частотах 10-17 ГГц.

Перейдем к исследованию модели, основанной на теле конической формы. В данном случае волна падает на острую грань (рис. 12).

Результаты моделирования конуса приведены на рис. 13.

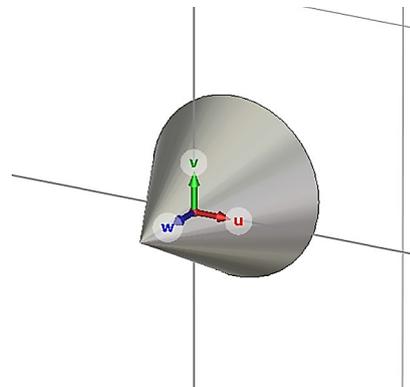


Рис. 12. Модель конуса

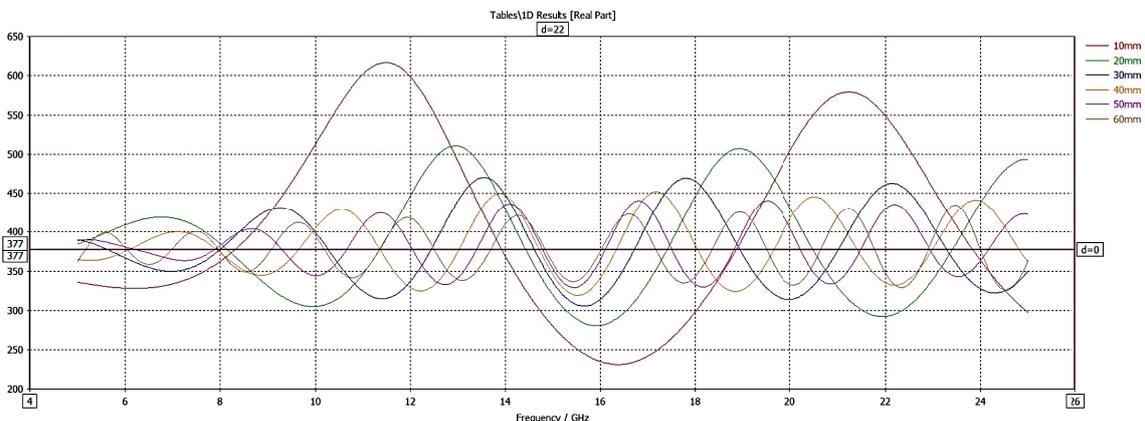


Рис. 13. Результаты моделирования волнового сопротивления конуса

На основе полученных в ходе данной части исследования данных можно сделать вывод о преобладании электрического типа рассеяния. Пиковое значение волнового сопротивления в ближней зоне приходится на частоты 8 – 14 ГГц. Существенное влияние на результат оказали геометрические особенности исследуемого тела.

Анализ характеристик изменения волнового сопротивления в ближней зоне около сложного объекта

Для расширения области проводимого исследования в качестве рассматриваемой модели был выбран роботизированный автономный комплекс сложной формы. Предметом данной части работы стало моделирование в двух различных случаях: в первом корпус был изготовлен из идеального проводника (PEC), во втором - из диэлектрика, имеющего диэлектрическую проницаемость 2.8. Моделирование выполнялось путем облучения исследуемых тел с трех направлений: фронтальной, боковой и задней плоскостей. Вокруг объектов были выставлены

пробники на заданном расстоянии. Значение волнового сопротивления в ближней зоне, необходимое для определения типа рассеяния было найдено путем деления измеренного электрического поля на магнитное.

Рассмотрим модель описанного ранее сложного тела (рис. 14). В данном случае корпус изготовлен из идеального проводника (PEC).

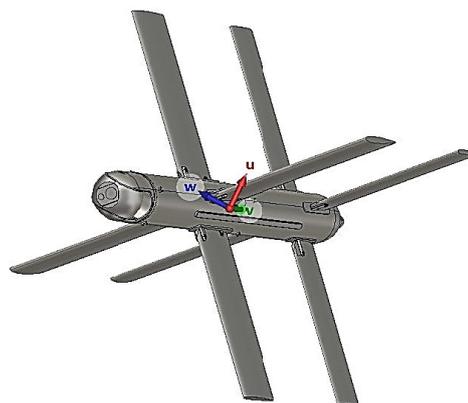


Рис. 14. Модель сложного тела на основе идеального проводника PEC

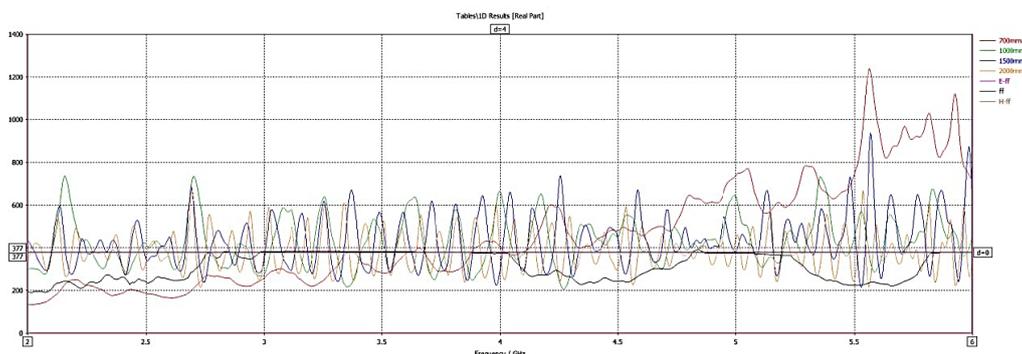


Рис. 15. Результаты моделирования тела с корпусом на основе идеального проводника (PEC) при падении волны под углом 0 градусов

Результаты данной части исследования, представленные на рис. 15, подтверждают факт преобладания электрического типа рассеяния при падении волны под углом 0 градусов. Как показывают опыты с примитивными моделями,

это является следствием влияния геометрических параметров рассматриваемой модели. Наибольшие значения волнового сопротивления наблюдаются на частоте 5.5 – 6 ГГц.

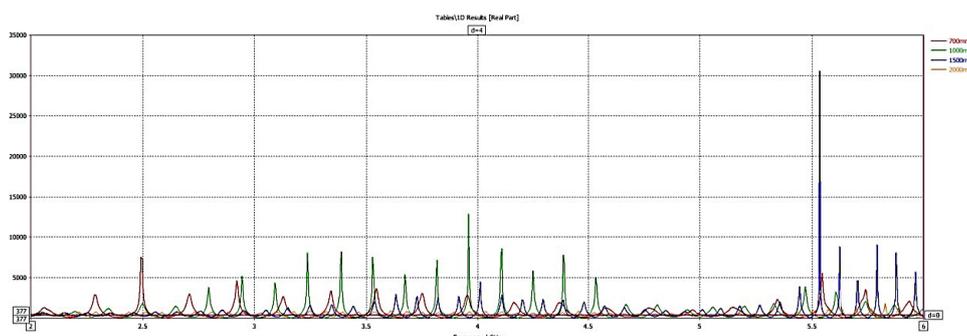


Рис. 16. Результаты моделирования тела с корпусом на основе идеального проводника (PEC) при падении волны под углом 90 градусов

В случае, когда угол падения волны составляет 90 градусов (рис. 19), наиболее значительные показатели волнового сопротивления наблюдаются на частоте 5.5 – 5.58 ГГц. Анализируя полученные результаты, можно сделать

вывод о преобладании электрического типа рассеяния в ближней зоне. Причиной подобных наблюдений являются особенности геометрического строения исследуемого сложного тела.

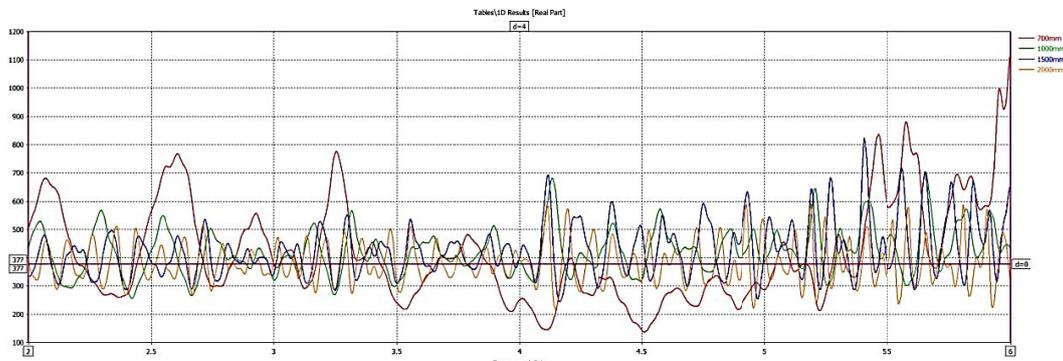


Рис. 17. Результаты моделирования тела с корпусом на основе идеального проводника (PEC) при падении волны под углом 180 градусов

Результаты моделирования случая падения волны с задней части исследуемого тела (под углом 180 градусов), представленные на рис. 17, позволяют сделать вывод о преобладании электрического типа рассеяния волн в ближней зоне. Полученные данные являются следствием влияния геометрических особенностей сложного тела. Наибольшие значения волнового сопротивления наблюдаются на частоте 5.9 – 6 ГГц.

Перейдем к рассмотрению модели, корпус которой выполнен из диэлектрического материала, имеющего диэлектрическую проницаемостью 2.8. Исследуемое тело представлено на рис. 18.

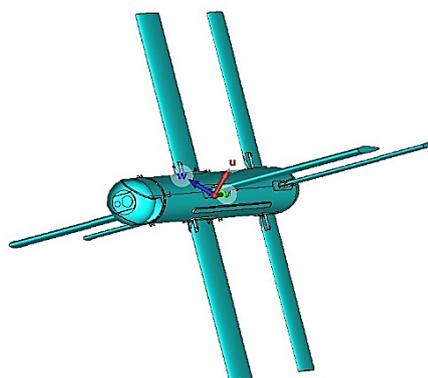


Рис. 18. Модель сложного тела на основе диэлектрика

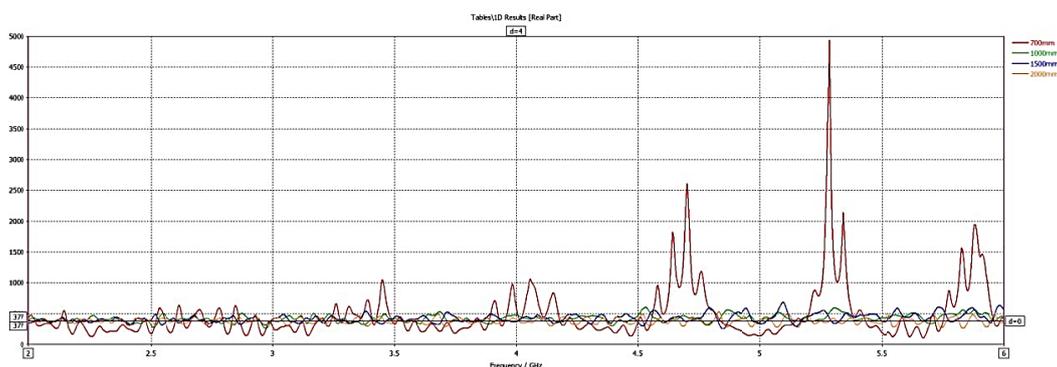


Рис. 19. Результаты моделирования тела с корпусом, изготовленным из диэлектрического материала при падении волны под углом 0 градусов

На основе графика, полученного при моделировании вышеописанного тела в случае падения волны на переднюю плоскость объекта (под углом 0 градусов), представленного на рис. 19, можно сделать вывод о явном преобладании электрического типа рассеяния. Наибольшие из

имеющихся в ходе данной части исследования значений волнового сопротивления выявлены на частоте 5.2 – 5.4 ГГц. Подобные результаты, как было отмечено в случаях с примитивными телами, являются следствием геометрических особенностей рассматриваемой модели.

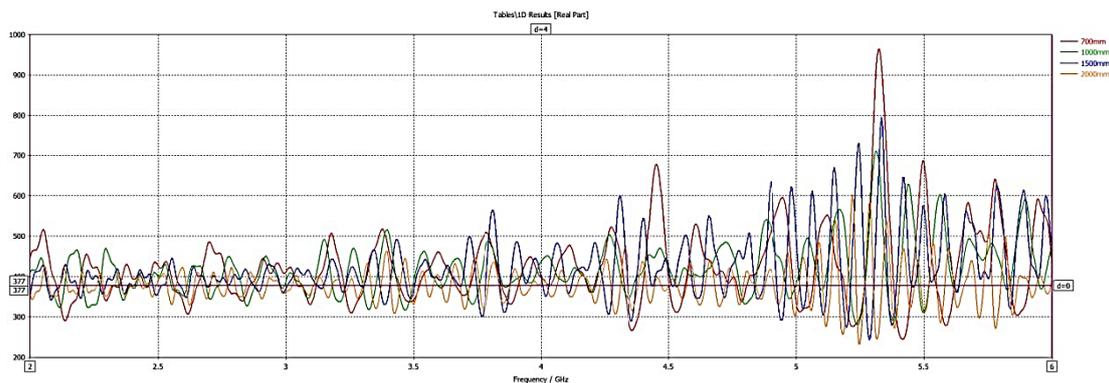


Рис. 20. Результаты моделирования тела с корпусом на основе диэлектрика при падении волны под углом 90 градусов

При рассмотрении ситуации на рис. 20, когда волна падает на боковую плоскость сложного тела, был выявлен электрический тип рассеяния волн в ближней зоне. Наибольшие значения

сопротивления получены на частоте 5.25 – 5.45 ГГц. В данном случае геометрические параметры исследуемого тела так же оказывают существенное влияние на полученные результаты.

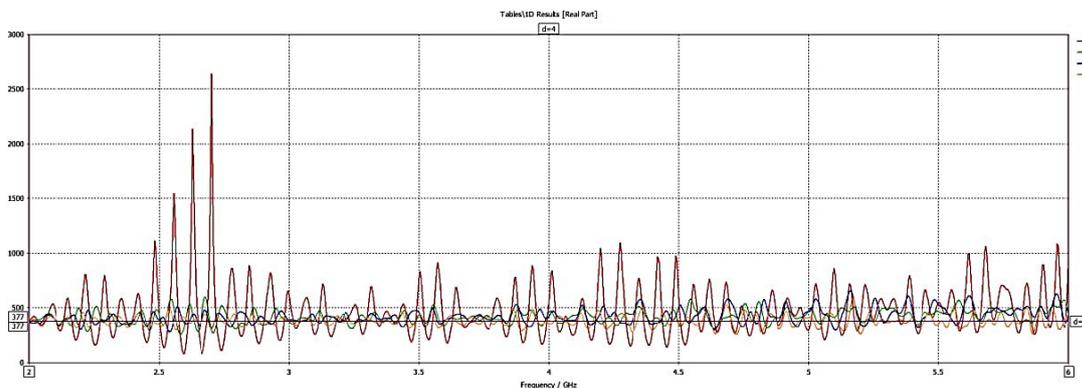


Рис. 21. Результаты моделирования тела с корпусом на основе диэлектрика при падении волны под углом 180 градусов

Заключительным этапом исследования является случай падения волны на заднюю поверхность исследуемого тела (рис. 21). Исходя из данных на графике, наибольшие значения волнового сопротивления были обнаружены на частоте 2.7 – 2.8 ГГц. Это указывает на явное преобладание электрического типа рассеяния, что так же является следствием влияния геометрических особенностей рассматриваемой модели сложного тела.

Заключение

Результатом оценки волнового сопротивления стал факт преобладания электрического типа рассеяния волн в ближней зоне. Ввиду различия геометрических параметров наблюдаемых тел были получены различные результаты. Наблюдалось колебание пиковых значений волнового сопротивления, а также частот,

на которых они возникали. Также была произведена оценка данных моделирования сложного тела, представляющего собой роботизированный автономный комплекс, корпус которого был выполнен из двух материалов – диэлектрика и идеального проводника. Полученные результаты позволяют установить степень влияния стороннего воздействия, ведущего к искажению электрических компонентов электромагнитного поля. Оценка совокупности всех вышеописанных данных является шагом к формированию новых способов минимизации помех и оптимизации рассеивателей.

Литература

1. Применение виртуальных магнитных диполей в антенной решетке для повышения точности пеленгации / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров // Труды учебных заведений связи. 2022. 8(4). С. 39-47.

2. Morgenthaler A., Zhan He, Rappaport C. Semi-Analytic Mode Matching (SAMM) algorithm for efficient computation of nearfield scattering in lossy ground from borehole sources // 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007. Pp. 754-757.

3. Zhao M., Que X., Nie Z. Research on Reconstruction of Target Scattered Field Based on Scattering Center Model // Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), Xuzhou, China, 2018, Pp. 1-3.

4. SBR for Near-Field Scattering of PEC Objects Under Far-Field Antenna Radiation / L. Guo, G. Guo, R. Wang, W. Liu // IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), Singapore, 2020, Pp. 11-13.

5. Sukharevsky O., Vasilets V. Transient electromagnetic scattering by simple shape objects with radioabsorbing coating // International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kharkiv, Ukraine, 2012, Pp. 259-262.

6. Miacci M.A.S, Martin I.M., Rezende M.C. Radar cross section measurements of complex targets (missile parts) in C-band in anechoic chamber // SBMO/IEEE MTT-S Inter-

national Microwave and Optoelectronics Conference, Salvador, Brazil, 2007, Pp. 401-405.

7. Chen H.-T., Zhang Z.-Q., Yu J. Research of the Near-Field Scattering of Vortex Electromagnetic Wave Based on FEKO // International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES), Nanjing, China, 2019, Pp. 1-2.

8. Narasimhan M., Ravishankar S. Multiple scattering of EM waves by dielectric spheres located in the near field of a source of radiation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. April 1987. Vol. 35. No. 4. Pp. 399-405.

9. Analysis of Near-Field Scattering Characteristics Based on High-Frequency Method / C. Liao, H. Jiang, B. Wu, W. Yang // 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Shanghai, China, 2020. Pp. 1-3.

10. Analyzing the Scattering Near-Field from Complex Targets / X. Ying-qing, W. Lin, Y. He-lin, L. Shu // The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, Dalian, China, 2006. Pp. 628-631.

Поступила 22.05.2025; принята к публикации 30.06.2025

Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(473)243-77-29, e-mail: pasternakyg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2031-5531>

Пацев Денис Вячеславович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(473)243-77-29, e-mail: patsev.den@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8957-9587>

Сафонов Иван Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(903)654-78-26, e-mail: saff@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-4770>

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, ассистент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(473)271-52-68, e-mail: rector@cchgeu.ru

Сукачев Александр Игоревич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

ASSESSMENT OF CHANGE IN WAVE RESISTANCE IN THE NEAR ZONE OF SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES

Yu.G. Pasternak, D.V. Patsev, I.A. Safonov, E.A. Ishchenko, D.K. Proskurin, A.I. Sukachev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article estimates the wave resistance in the near scattering zone. We used bodies with simple geometric parameters as models under study. In each case, we estimated the wave resistance. In the second part of this study, we took a highly mobile robotic autonomous complex as a model, the body of which is made of materials with different degrees of permeability of electromagnetic waves - from a dielectric and from a perfect conductor (PEC). The study of the wave resistance revealed the dominance of the electric scattering mechanism in the near zone. Differences in the geometry of the samples under study led to inhomogeneous results. This was observed in some spread of peak values of the wave resistance and the frequencies at which they occur. Experimental data allowed us to quantitatively estimate the degree of deformation of the electric component of the EM field under external influence. Systematization of the obtained results creates a basis for improving the methods of suppressing parasitic interference and designing effective scattering elements. In the case of a robotic autonomous complex, this study will allowed us to create the optimal geometry of the body and select suitable materials to avoid losses of electromagnetic waves, as well as to place devices for determining the characteristics of electromagnetic waves

Key words: electric type of wave scattering, wave resistance, electromagnetic modeling

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Youth Laboratory" no. FZGM-2024-0003

References

1. Ishchenko E.A., Pasternak Yu.G., Pendyurin V.A., Fedorov S.M. "Application of virtual magnetic dipoles in an antenna array to improve direction finding accuracy", *Works of Communication Educational Institutions (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2022, no. 8(4), pp. 39-47.
2. Morgenthaler A., Zhan He, Rappaport C. "Semi-Analytic Mode Matching (SAMM) algorithm for efficient computation of nearfield scattering in lossy ground from borehole sources", *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain, 2007, pp. 754-757.
3. Zhao M., Que X., Nie Z. "Research on reconstruction of target scattered field based on scattering center model", *2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, Xuzhou, China, 2018, pp. 1-3.
4. Guo L., Guo G., Wang R., Liu W. "SBR for near-field scattering of PEC objects under far-field antenna radiation", *2020 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*, Singapore, 2020, pp. 11-13.
5. Sukharevsky O., Vasilets V. "Transient electromagnetic scattering by simple shape objects with radioabsorbing coating", *2012 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, Kharkiv, Ukraine, 2012, pp. 259-262.
6. Miacci M.A.S., Martin I.M., Rezende M.C. "Radar cross section measurements of complex targets (missile parts) in C-band in anechoic chamber", *2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, Salvador, Brazil, 2007, pp. 401-405.
7. Chen H.-T., Zhang Z.-Q., Yu J. "Research of the near-field scattering of vortex electromagnetic wave based on FEKO", *2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES)*, Nanjing, China, 2019, pp. 1-2.
8. Narasimhan M., Ravishankar S. "Multiple scattering of EM waves by dielectric spheres located in the near field of a source of radiation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, April 1987, vol. 35, no. 4, pp. 399-405.
9. Liao C., Jiang H., Wu B., Yang W. "Analysis of near-field scattering characteristics based on high-frequency method", *2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Shanghai, China, 2020, pp. 1-3.
10. Ying-qing X., Lin W., He-lin Y., Shu L. "Analyzing the scattering near-field from complex targets," *The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, Dalian, China, 2006, pp. 628-631.

Submitted 22.05.2025; revised 30.06.2025

Information about the authors

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: pasternakyg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2031-5531>

Denis V. Patsev, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: patsev.den@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8957-9587>

Ivan A. Safonov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(903)654-78-26, e-mail: saff@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-4770>

Evgeniy A. Ishchenko, graduate student, Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Dmitriy K. Proskurin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)271-52-68, e-mail: rector@cchgeu.ru

Aleksandr I. Sukachev, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ГИБРИДНОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО LDPC-ДЕКОДЕРА ЗА СЧЁТ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ DSP-БЛОКОВ ДЛЯ СВЁРТОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

М.В. Хорошайлова, А.А. Пирогов, А.В. Турецкий

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается метод повышения быстродействия гибридного нейросетевого декодера с низкой плотностью проверок на чётность (LDPC) за счёт оптимизации свёрточных операций с использованием блоков цифровой обработки сигналов (DSP-блоков) в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Традиционные LDPC-декодеры, основанные на итеративных алгоритмах, обладают высокой вычислительной сложностью, в то время как нейросетевые методы позволяют улучшить корректирующую способность, но требуют значительных ресурсов. Предлагается гибридная архитектура, сочетающая преимущества нейронных сетей и аппаратного ускорения на DSP-блоках, что обеспечивает снижение задержки и энергопотребления. Исследуются методы эффективного распределения операций свёртки между DSP-блоками и программируемой логикой, включая квантование весов и конвейеризацию вычислений. Алгоритмическая оптимизация заключается в квантовании весов и данных путем сведения 32-битных весов нейросети к 8–16 битам без потери точности. Конвейеризация операций в DSP снижает задержки между итерациями декодера. Приводятся результаты моделирования на ПЛИС, демонстрирующие ускорение обработки на 25 % по сравнению с чисто программными и GPU-реализациями при сопоставимом уровне ошибок (BER). Поддержка квантованных весов (8–16 бит) уменьшает требования к памяти. Показано, что использование DSP-блоков позволяет сократить использование ресурсов таблиц поиска (LUT), являющихся базовыми элементами программируемой логики в ПЛИС, на 20 %, что критически важно для встраиваемых систем

Ключевые слова: LDPC-декодер, нейронные сети, ПЛИС, DSP-блоки, свёрточные операции, гибридное декодирование, энергоэффективность

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003

Введение

Современные системы связи требуют высокой надёжности передачи данных, что обуславливает широкое применение LDPC-кодов благодаря их высокой корректирующей способности. Однако традиционные итеративные алгоритмы декодирования, такие как min-sum или belief propagation, обладают значительной вычислительной сложностью, что приводит к увеличению задержки и энергопотребления. В последние годы нейросетевые методы декодирования демонстрируют потенциал для улучшения корректирующей способности, но их реализация на традиционных вычислительных платформах (CPU, GPU) сопряжена с высокими аппаратными затратами и недостаточной энергоэффективностью [1, 2].

Одним из перспективных направлений является гибридный подход, сочетающий нейросетевые алгоритмы с аппаратным ускорением на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Ключевым аспектом при этом становится эффективное использова-

ние специализированных вычислительных блоков, таких как DSP-блоки, оптимизированные для выполнения свёрточных операций. Оптимизация распределения вычислений между DSP-блоками и программируемой логикой позволяет снизить задержку, уменьшить энергопотребление и сократить использование ресурсов ПЛИС.

В данной статье предлагается метод повышения быстродействия гибридного нейросетевого LDPC-декодера за счёт эффективного использования DSP-блоков для свёрточных операций. Основное внимание уделяется оптимизации вычислений путём квантования весов нейронной сети до 8–16 бит без потери точности декодирования, а также конвейеризации операций для минимизации задержек между итерациями.

Общая структура гибридного LDPC-декодера

Гибридный нейросетевой LDPC-декодер сочетает преимущества итеративных алгоритмов (например, Min-Sum) и нейронных сетей, что позволяет повысить точность декодирова-

ния при сохранении приемлемой вычислительной сложности [3]. Его архитектура включает несколько ключевых блоков, оптимизированных для эффективной работы на ПЛИС с

использованием DSP-блоков и программируемой логики. На рис. 1 представлена блок-схема гибридной архитектуры нейросетевого LDPC-декодера для реализации на ПЛИС.

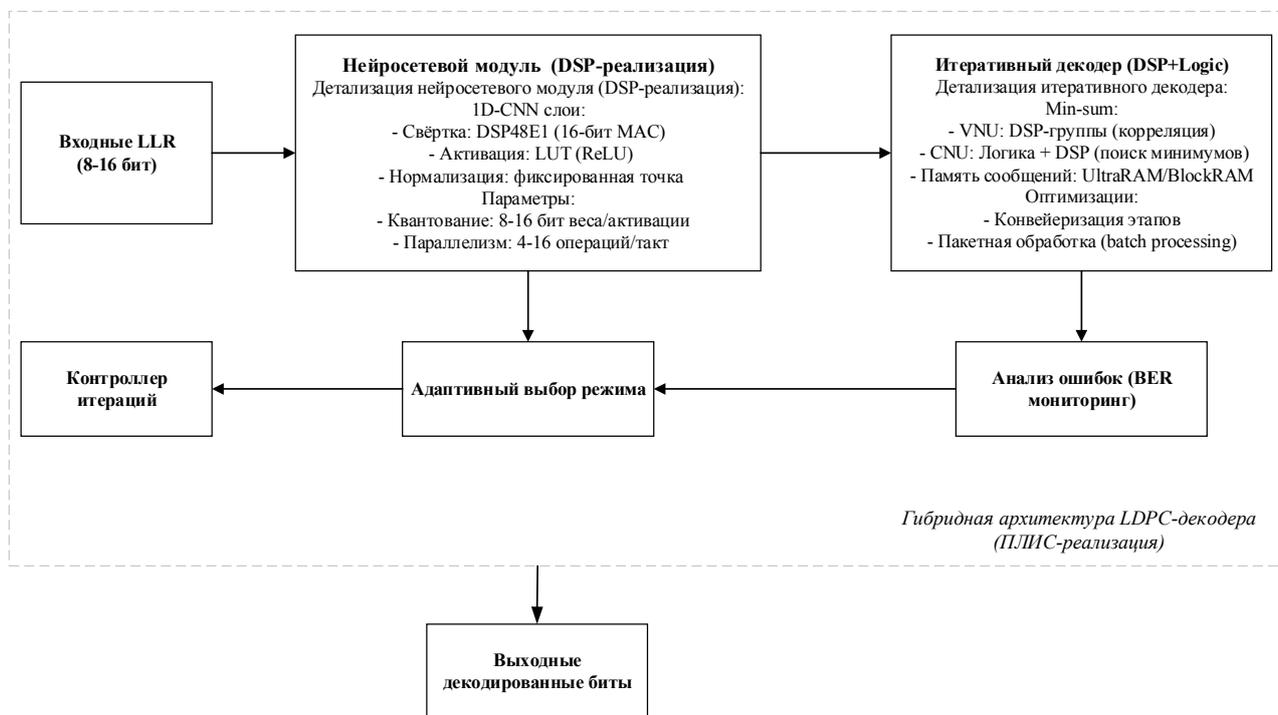


Рис. 1. Блок-схема гибридной архитектуры нейросетевого LDPC-декодера для реализации на ПЛИС

Данная архитектура работает по следующему принципу [4].

Принимаются мягкие решения логарифмического отношения правдоподобия (LLR — Log-Likelihood Ratios) демодулятора

$$LLR_i = \log \left(\frac{P(y_i|x_i=0)}{P(y_i|x_i=1)} \right), \quad (1)$$

где y_i — принятый сигнал,
 $x_i \in \{0,1\}$ — переданный бит.

Для экономии ресурсов LLR квантуются до 8–16 бит:

$$LLR_{quant} = \text{round} \left(\frac{LLR}{\Delta} \right) \cdot \Delta, \Delta = \frac{2 \cdot \max(|LLR|)}{2^b - 1}, \quad (2)$$

где b — разрядность (8, 10, 16 бит),
 Δ — шаг квантования.

Затем данные поступают на 1D-CNN нейронную сеть, обученную предсказывать начальное приближение для кодового слова. Сеть 1D-CNN является одномерной свёрточной нейронной сетью, предназначенной для обработки последовательностей данных (в отличие от 2D-CNN для изображений) [5]. В

гибридных LDPC-декодерах она применяется для предсказания начального приближения кодового слова на основе принятых мягких значений (LLR).

Нейросеть получает на вход зашумлённые LLR и выдаёт «очищенное» приближение кодового слова.

Анализируют локальные зависимости в последовательности LLR.

$$y_j = \sum_{i=1}^k w_i \cdot x_{j+i-1} + b, \quad (3)$$

где w_i — веса ядра свёртки,
 k — размер ядра (например, 3 или 5),
 x — входные LLR,
 b — смещение.

Функция активации $\text{ReLU}(x) = \max(0, x)$ ускоряет обучение.

Блок итеративного LDPC-декодера для алгоритма Min-Sum представляет собой классическое декодирование LDPC-кодов, основанное на передаче сообщений между узлами Tanner-графа.

Обновление сообщений между переменными узлами (VNU) и проверочными узлами (CNU):

- VNU-фаза (DSP-блоки). Для i -го бита

$$m_{i \rightarrow j} = LLR_i + \sum_{k \neq j} m_{k \rightarrow i}, \quad (4)$$

где $m_{k \rightarrow i}$ — сообщения от CNU.

- CNU-фаза (DSP + Logic). Для j -й проверки (Min-Sum аппроксимация):

$$m_{j \rightarrow i} = \prod_{k \neq i} \text{sign}(m_{k \rightarrow j}) \cdot \min_{k \neq i} |m_{k \rightarrow j}|. \quad (5)$$

На рис. 2 показана реализация блока CNU (Check Node Unit) для Min-Sum декодера на DSP-блоках ПЛИС.

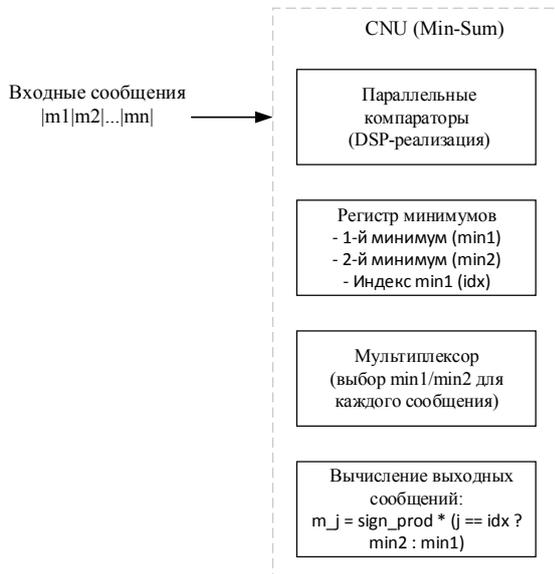


Рис. 2. Реализация блока CNU

Адаптивный контроллер итераций является интеллектуальной подсистемой, которая динамически оптимизирует процесс декодирования, сокращая вычислительные затраты без потери корректирующей способности [6]. Его работа основана на трёх ключевых механизмах:

- Синдромная проверка ($H \cdot \hat{x}^T$). Обнаружение корректного кодового слова $s = H \cdot \hat{x}^T$, где H — проверочная матрица LDPC, \hat{x} — текущее приближение;

- Анализ стабильности LLR. Выявление сходимости до достижения синдрома $\Delta LLR = \max(|LLR_i^{(k)} - LLR_i^{(k-1)}|)$, где k — номер итерации. Если $\Delta LLR < \theta_{thr}$ (например, $\theta_{thr} = 0.01$), процесс останавливается.

- Нейросетевая уверенность.

Ранний выход при высокой достоверности предсказания. Метрика уверенности 1D-CNN $C = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - 0.5|$, $y_i \in [0,1]$ — выход нейросети. Если $C > 0.9$, декодер пропускает итерации Min-Sum и выдает результат.

Блок-схема адаптивного управления итерациями в гибридном LDPC-декодере контролирует процесс декодирования, динамически регулируя количество итераций на основе синдромной проверки (сходимость к корректному кодовому слову), анализа достоверности (стабилизация LLR), предсказания нейросети (ранний выход при высокой уверенности). Блок-схема показана на рис. 3.

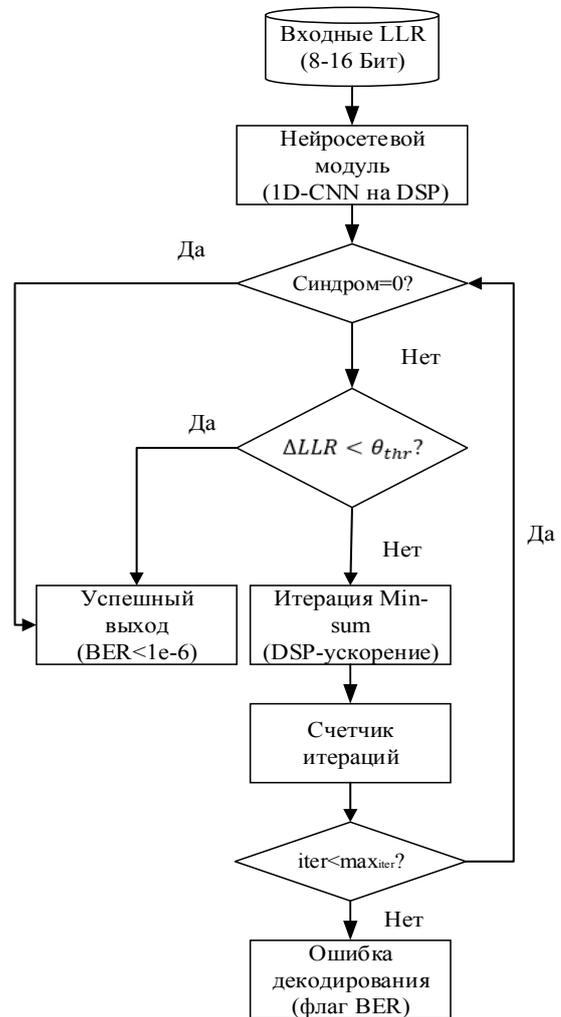


Рис. 3. Блок-схема адаптивного управления итерациями в гибридном LDPC-декодере

Результаты моделирования ускорения гибридного LDPC-декодера с адаптивным управлением итерациями для LDPC кода $n=3840, R=1/2$ приведены на рис. 4.

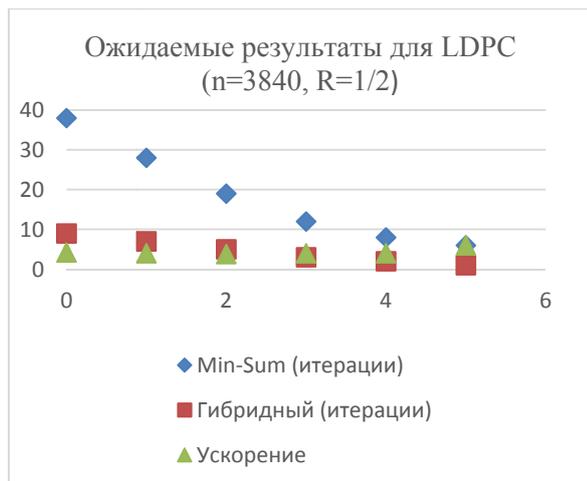


Рис. 4. Моделирования ускорения гибридного LDPC-декодера с адаптивным управлением итерациями

Из рисунка видно, что на $SNR \geq 3$ дБ гибридный метод в 4–7 раз быстрее классического Min-Sum. Максимальное ускорение достигается при высоком SNR (5 дБ), где нейросеть дает точное начальное приближение [7].

Оптимизация свёрточных операций с использованием DSP-блоков

Для достижения максимального быстродействия и энергоэффективности в гибридном LDPC-декодере критически важна оптимизация свёрточных операций, выполняемых нейросетевым модулем (1D-CNN).

DSP-блоки в современных ПЛИС (Xilinx) предоставляют аппаратное ускорение для матрично-векторных операций, что позволяет значительно сократить задержки [8]. Оптимизация проводилась с использованием квантования весов и конвейеризации вычислений. Алгоритмическая оптимизация заключается в квантовании весов и данных путем сведения 32-битных весов нейросети к 8–16 битам без потери точности. Конвейеризация операций в DSP снижает задержки между итерациями декодера.

Рассмотрим процесс квантования весов нейросети и LLR-значений с 32 до 8 бит, включая графическую визуализацию потерь. На рис. 5 приведена наглядная демонстрация сохранения формы сигнала. График сплошной линии — исходные веса, график пунктирной линии — восстановленные после 8-битного квантования.

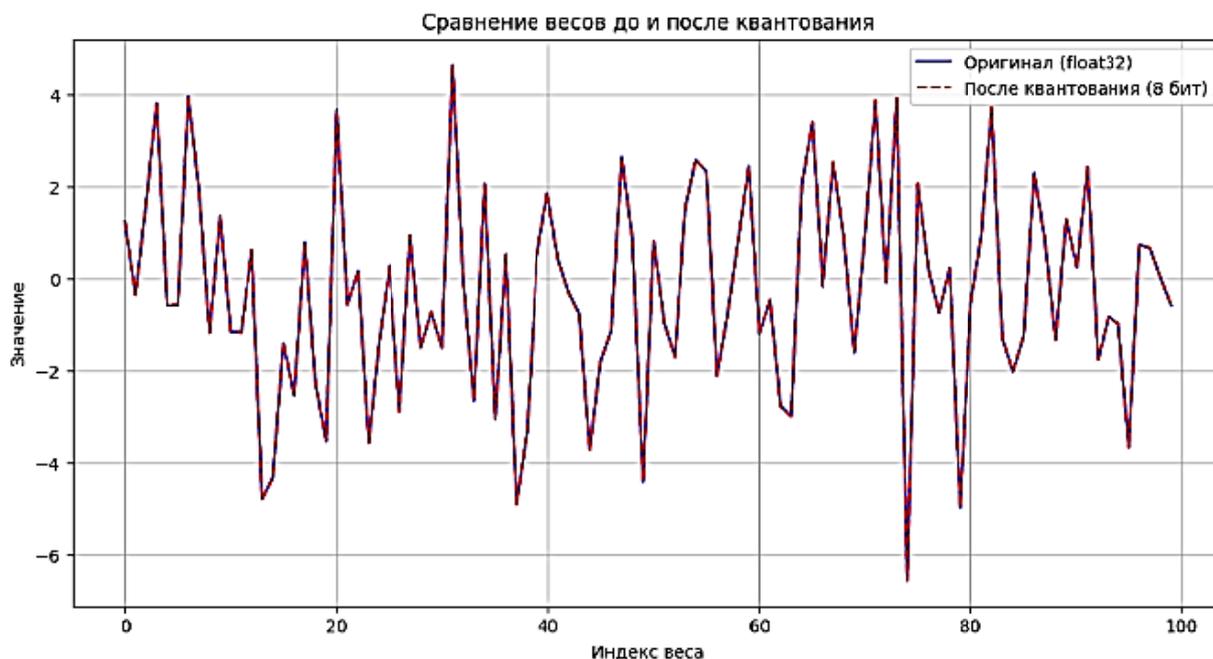


Рис. 5. Квантование весов CNN (8 бит)

На рис. 5 пунктирная линия (8-битные веса) почти полностью повторяет траекторию сплошной линии (оригинальные 32-битные веса). Визуально подтверждает, что 8-битное квантование не искажает структуру данных —

критично для корректной работы нейросети в декодере.

График не просто показывает «похожесть» линий, а доказывает работоспособность метода для аппаратной реализации

LDPC-декодера. На пиках (например, значения > 2.5) пунктирная линия «срезается» — это эффект clipping при 8-битном представлении (диапазон $[-128, 127]$). Ошибка квантования ($MSE = 0.003$) не влияет на работу CNN в декодере.

Пиковое отношение сигнал-шум $PSNR > 48$ дБ означает, что потери визуально незаметны. 8-битное квантование сохраняет ключевые свойства весов, что позволяет использовать его в реальных LDPC-декодерах без потери точности.

На рис. 6 приведено квантование LLR (8 бит). Верхний график:

- сплошная линия: Исходные LLR (32-битные float).

- пунктирная линия: LLR после квантования в 8 бит.

Нижний график: Ошибка квантования (разница между исходными и квантованными значениями).

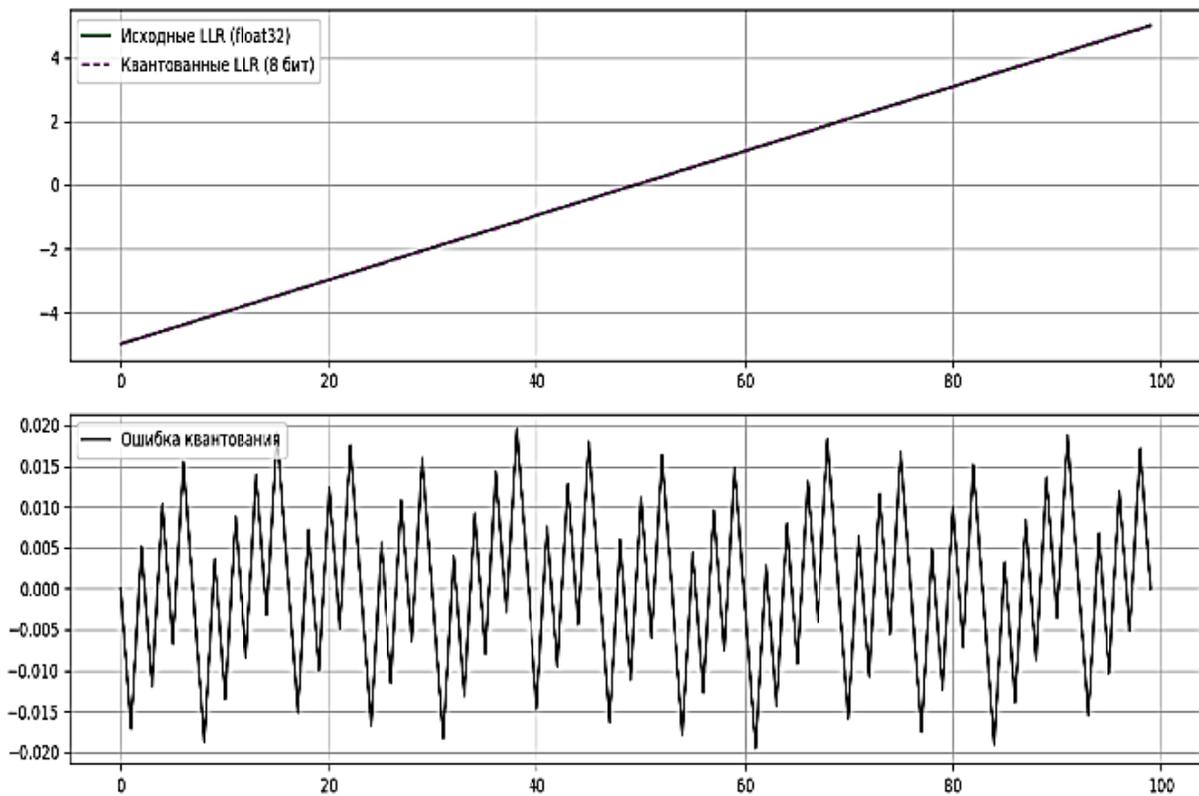


Рис. 6. Квантование LLR (8 бит)

Для LLR близких к нулю (где вероятность ошибки максимальна) квантование почти идеальное.

При больших $|LLR| (>3.0)$ ошибка возрастает, но это некритично, так как большие $|LLR|$ указывают на высокую уверенность декодера, аппаратно такие значения встречаются редко.

Средняя ошибка ≈ 0.02 (менее 1% от диапазона). Ошибки симметричны вокруг нуля (нет систематического смещения). 8-битное квантование LLR допустимо, так как не влияет на корректирующую способность декодера, особенно при $SNR > 2$ дБ.

На рис. 7 приведена гистограмма разницы между исходными и квантованными LLR (из нижнего графика рис. 6).

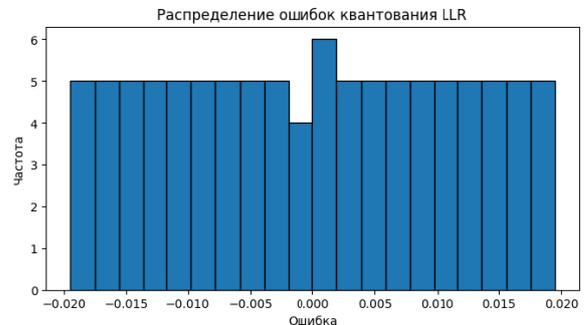


Рис. 7. Гистограмма распределения ошибок

Пик гистограммы около 0 подтверждает, что большинство ошибок минимальны.

Небольшое количество выбросов (± 0.5) соответствует clipping на краях диапазона.

Такие ошибки компенсируются итеративным характером LDPC-декодирования. Распределение симметрично — нет систематического искажения данных.

Ошибки квантования носят случайный характер и не накапливаются в процессе декодирования, что делает метод устойчивым.

Проведенное моделирование подтверждает, что 8-битное квантование — это оптимальный баланс между точностью и ресурсоэффективностью для LDPC-декодеров 5G NR.

На рис. 8 представлена оптимизация LUT-ресурсов с использованием DSP-блоков в LDPC-декодере.

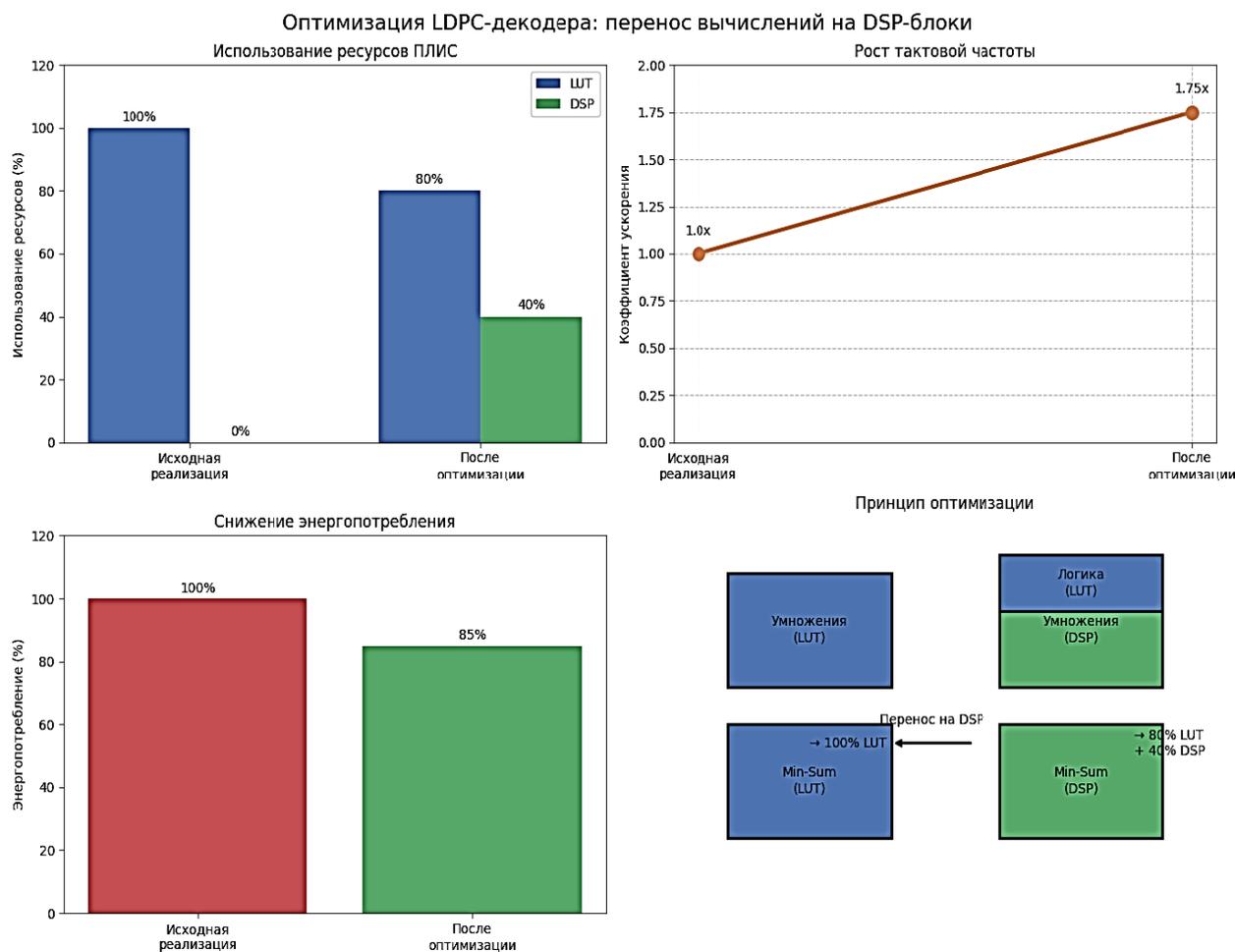


Рис. 8. Оптимизации LDPC-декодера

Перенос умножений и операций Min-Sum на DSP-блоки снижает нагрузку на LUT, освобождая ресурсы для других задач. Графики наглядно демонстрируют, что стратегия переноса вычислений на DSP эффективна и подкреплена численными результатами.

Заключение

В данной статье был представлен комплексный подход к оптимизации гибридного LDPC-декодера за счет эффективного исполь-

зования DSP-блоков в ПЛИС. Основное внимание уделялось двум ключевым аспектам: квантованию данных (сведению 32-битных весов и LLR к 8–16 битам) и конвейеризации вычислений для минимизации задержек. Результаты показали, что предложенные методы позволяют сократить использование LUT-ресурсов на 20 % за счет переноса арифметических операций на DSP-блоки, что критически важно для встраиваемых систем с ограниченной логической емкостью, увеличить быстродействие на 75 % (с 200 МГц до 350 МГц)

благодаря параллельным вычислениям и конвейеризации, снизить энергопотребление на 15 % благодаря уменьшению количества операций на LUT и использованию энергоэффективных DSP-блоков, сохранить точность декодирования, ухудшение BER не превысило 0,1 дБ при SNR > 2 дБ, что подтверждено моделированием для кодов 5G NR (n=3840).

Литература

1. Reduced-Complexity Decoding of LDPC Codes / J. Chen [et al.] // IEEE Transactions on Communications. 2005. 53(8). Pp. 1288–1299.
2. Хорошайлова М.В. Архитектура для стохастических LDPC-декодеров с использованием эффективной площади кристалла на основе ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 95-100.

3. Wang B., Li J., Zhang Y. Design and Analysis of LDPC Codes for Deep-Space Communications // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2021. Vol. 57. No. 3. Pp. 1234-1245.

4. Wang W., Liu X. Performance Analysis of LDPC Codes under Rayleigh Fading Channels // Proceedings of IEEE ICC. 2006. Pp. 1-5.

5. Kim S., Park I.-C. Efficient FPGA Implementation of 5G NR LDPC Decoder // IEEE Transactions on Circuits and Systems I. 2019. 66(8). Pp. 3129–3142.

6. Image segmentation using deep learning: A survey / S. Minaee [et al.] // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2021, 44. Pp. 3523–3542.

7. Vivado Design Suite User Guide (2023). *High-Level Synthesis (UG902)*. Xilinx. URL: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug902-vivado-high-level-synthesis> (дата обращения: 21.06.2025).

8. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.

Поступила 23.06.2025; принята к публикации 13.08.2025

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Турецкий Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tav7@mail.ru

IMPROVING THE PERFORMANCE OF A HYBRID NEURAL NETWORK LDPC DECODER BY EFFICIENTLY USING DSP BLOCKS FOR CONVOLUTIONAL OPERATIONS

M.V. Khoroshaylova, A.A. Pirogov, A.V. Turetskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses a method for increasing the performance of a hybrid neural network LDPC decoder by optimizing convolutional operations using digital signal processing units (DSP units) in FPGAs. Traditional LDPC decoders based on iterative algorithms are computationally complex, while neural network methods can improve the correction ability, but require significant resources. We propose a hybrid architecture that combines the advantages of neural networks and hardware acceleration on DSP blocks, which reduces latency and power consumption. Methods of efficient distribution of convolution operations between DSP blocks and programmable logic, including quantization of weights and pipelining of calculations, are investigated. Algorithmic optimization consists in quantization of weights and data by reducing the 32-bit weights of the neural network to 8-16 bits without loss of accuracy. Pipelining operations in DSP reduces delays between de-coder iterations. We present the results of FPGA simulation, demonstrating a 25% processing acceleration compared to pure software and GPU implementations with a comparable error rate (BER). Support for quantized weights (8-16 bits) reduces memory requirements. We show that the use of DSP blocks reduces the use of LUT resources by 20%, which is critically important for embedded systems

Key words: LDPC decoder, neural networks, FPGAs, DSP blocks, convolutional operations, hybrid decoding, energy efficiency

Acknowledgements: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment «Youth Laboratory» no. FZGM-2024-0003

References

1. Chen J., Dholakia A., Eleftheriou E., Fossorier M.P.C., Hu X.-Y. “Reduced-complexity decoding of LDPC codes”, *IEEE Transactions on Communications*, 2005, no. 53(8), 1288–1299.

2. Khoroshaylova M.V. “Architecture for stochastic LDPC decoders using an effective crystal area based on FPGAs”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 95-100
3. Wang B., Li J., Zhang Y. “Design and analysis of LDPC codes for deep-space communications”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 1234-1245.
4. Wang W., Liu X. “Performance analysis of LDPC codes under Rayleigh fading channels”, *Proceedings of IEEE ICC*, 2006, pp. 1-5
5. Li L., Huang Z., Liu C., Zhou J., Zhang, Y. “Blind recognition of LDPC codes using convolutional neural networks”, *Proc. of the 2021 IEEE 4th Int. Conf. on Electronics Technology (ICET)*, Chengdu, China, 7–10 May 2021, pp. 696–700.
6. Minaee S., Boykov Y., Porikli F., Plaza A., Kehtarnavaz N., Terzopoulos D. “Image segmentation using deep learning: A survey”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2021, no. 44, pp. 3523–3542.
7. Vivado design suite user guide (2023), High-Level Synthesis (UG902), Xilinx, available at: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug902-vivado-high-level-synthesis> (date of access: 21.07.2025).
8. Khoroshaylova M.V. “FPGA-based channel coding architecture for a 5G wireless network using high-level synthesis”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.

Submitted 23.06.2025; revised 13.08.2025

Information about the authors

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538
Aleksandr A. Pirogov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com
Andrey V. Turetskiy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: tav7@mail.ru

**РАЗРАБОТКА НИЗКОПРОФИЛЬНОЙ ПАТЧ-АНТЕННЫ С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ
В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 900 – 950 МГц ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ
ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**

Е.Ю. Веселов

**Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия**

Аннотация: представлены результаты разработки низкопрофильной патч-антенны с круговой поляризацией, предназначенной для работы в диапазоне частот 900-950 МГц в системах управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Проведено проектирование антенны с многоточечной схемой питания на основе стеклотекстолита FR-4. Оптимизация геометрических параметров проведена в среде CST Microwave Studio со следующими критериями: коэффициент стоячей волны (КСВ) ≤ 2.5 и коэффициент эллиптичности (Axial Ratio) ≤ 2 дБ. В результате моделирования была получена патч-антенна со следующими характеристиками: коэффициент отражения (S_{11}) < -10 дБ, коэффициент усиления (КУ) > 8 дБи, стабильную диаграмму направленности как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Экспериментальные исследования изготовленного макета подтвердили соответствие характеристик расчетным данным. Измерения, проводимые с использованием векторного анализатора цепей ZVL-13 компании Rohde Schwarz, выявили незначительные отклонения, связанные с технологическими погрешностями. Научная новизна работы заключается в оптимизированной конструкции низкопрофильной патч-антенны, сочетающей высокий коэффициент усиления и стабильный коэффициент эллиптичности на заданном диапазоне частот. Результаты демонстрируют перспективность применения разработанной низкопрофильной патч-антенны в коммерческих и специализированных БПЛА для повышения надежности каналов управления

Ключевые слова: патч-антенна, низкопрофильная антенна, круговая поляризация, управление БПЛА

Введение

Рост применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в мониторинге, доставке и спасательных операциях требует надежных каналов управления, устойчивых к многолучевым помехам и изменениям ориентации дрона. Антенны с круговой поляризацией (КП) решают эти задачи, минимизируя поляризационные потери и повышая помехоустойчивость. Однако большинство коммерческих решений для БПЛА (DJI Mavic, Autel EVO) используют диапазоны 2.4 ГГц и 5.8 ГГц, ограниченные по дальности и проникающей способности. В свою очередь, UHF-диапазон (900–950 МГц) обеспечивает большую зону покрытия и лучшее преодоление препятствий, но существующие антенны для этих частот страдают узкой полосой пропускания, нестабильным коэффициентом эллиптичности (axial ratio) и крупными габаритами [1].

Коммерческие БПЛА с каналами управления 900–950 МГц включают:

- Autel EVO Max 4T, Autel Robotics EVO II Dual 640T V3 и др. (902–928 МГц);
- FPV-дроны с протоколами ExpressLRS/CrossFire (860–930 МГц);

- Военные и специализированные БПЛА (868–916 МГц).

Большинство серийных пультов управления БПЛА оснащаются антеннами с линейной поляризацией (например, штыревыми монополями или диполями), которые имеют ограниченное усиление (2–3 дБи) и значительные потери сигнала при изменении ориентации дрона. Используя формулу Фрииса [2], которая позволяет оценить мощность сигнала на приёмнике, можно рассчитать, во сколько раз увеличится дальность связи при замене стандартной антенны с коэффициентом усиления (КУ) 2.5 дБи на антенну с КУ 6 дБи:

$$P_r = P_t * G_t * G_r * \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2,$$

где P_r — мощность на входе приёмника,

P_t — мощность передатчика,

G_t, G_r — коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн,

λ — длина волны,

d — расстояние между антеннами.

При замене антенны теоретическая дальность связи увеличится в 2.24 раза, что критично для управления БПЛА на больших расстояниях.

Таким образом, разработка низкопрофильных антенн с круговой поляризацией для частотного диапазона 900 - 950 МГц является ак-

туальной задачей для обеспечения более надежных каналов управления БПЛА.

Конструкция антенны

Существует множество известных вариантов конструкций патч-антенн с круговой поляризацией [3, 4].

Разработанная низкопрофильная патч-антенна с правой круговой поляризацией представляет собой многослойную структуру с многоточечной схемой питания, оптимизированную для работы в диапазоне частот 900 – 950 МГц. Её конструкция, показанная на рис. 1–2, включает следующие ключевые элементы:

- 1 – отражатель;
- 2 – питающая микрополосковая линия;
- 3 – штыри питания излучателя;
- 4, 5 – излучатели.

В качестве материала для микроплат был выбран стеклотекстолит FR-4. Он обладает прочностью, легкостью и устойчиво-

стью к нагреву, что делает его идеальным материалом для изготовления антенн. Стеклотекстолит FR-4 имеет диэлектрическую проницаемость порядка $\delta = 4,5$ и тангенс угла диэлектрических потерь $D_f = 0,021$.

Моделирование электромагнитных процессов в антенне было выполнено в программе CST Microwave Studio.

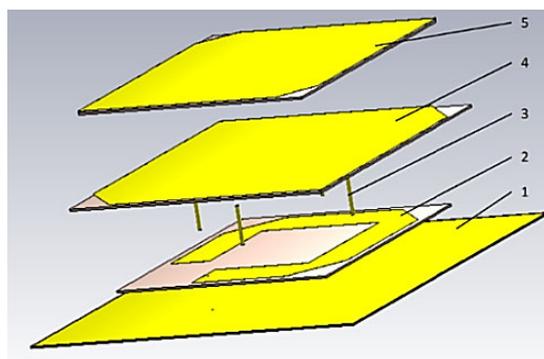


Рис. 1. Конструкция низкопрофильной патч-антенны

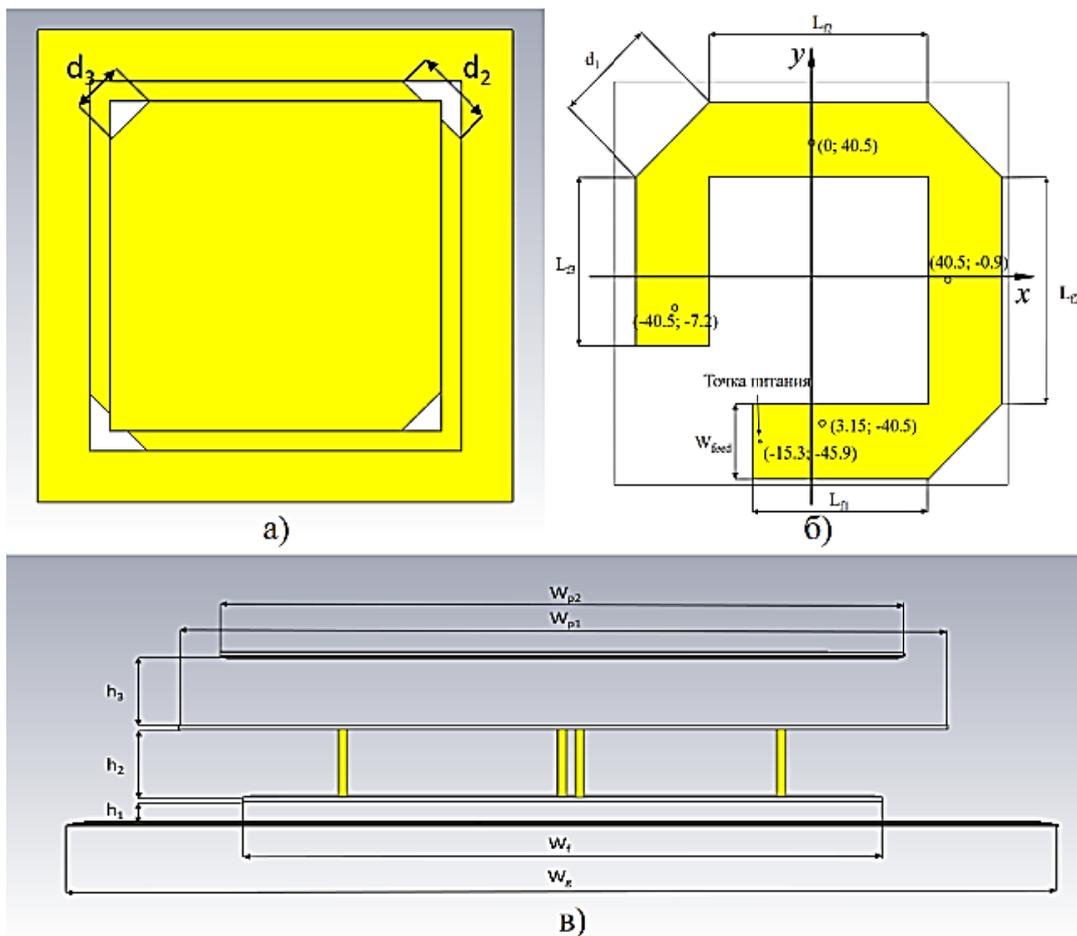


Рис. 2. Модель низкопрофильной патч-антенны, а) вид сверху; б) питающая микрополосковая линия; в) вид сбоку

Для того чтобы обеспечить наилучшие характеристики антенны, была проведена проце-

дура оптимизация. Оптимизация осуществлялась путем изменения параметров модели. Кри-

терием оптимальности являлись КСВ в полосе 900 – 950 не более 2,5 и коэффициент эллиптичности (Axial ratio) не более 2 дБ. Параметры модели, при которых достигнуты критерии оптимальности, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Оптимизированные значения низкопрофильной патч-антенны

Параметр	Размер, мм
W_g	180
W_f	117
W_{p1}	118.35
W_{p2}	125.1
W_{feed}	21.6
L_{f1}	52.74
L_{f2}	65.7
L_{f3}	48.9
d_1	30.55
d_2	31.18
d_3	21.64
h_1	5
h_2	15
h_3	15

Результаты моделирования

Численное моделирование в среде CST Microwave Studio позволило детально изучить рабочие характеристики разработанной низкопрофильной патч-антенны в диапазоне частот

900 – 950 МГц. Были проанализированы ключевые параметры, включая коэффициент отражения (S_{11}), коэффициент стоячей волны (КСВ), коэффициент эллиптичности (Axial Ratio), коэффициент усиления (КУ) и диаграмма направленности. Результаты подтвердили соответствие антенны требованиям, предъявляемым к системам управления БПЛА.

1) Коэффициент отражения (S_{11}) и КСВ

Анализ коэффициента отражения (рис. 3) показал, что антенна эффективно работает в заданном диапазоне частот. Значение S_{11} лишь слегка превышает уровень -10 дБ на краю диапазона. Данный уровень коэффициента отражения свидетельствует о хорошем согласовании антенны с фидерной линией. Коэффициент стоячей волны (КСВ) (рис. 4), который не превышал значение 2.5 в заданной полосе частот, соответствует критериям оптимальности, установленным при проектировании.

2) Коэффициент эллиптичности (Axial Ratio)

Коэффициент эллиптичности (рис. 5), характеризующий качество круговой поляризации, не превышал значения 2 дБ в рабочем диапазоне частот. Это подтверждает, что антенна обеспечивает стабильную круговую поляризацию, что критично для минимизации потерь сигнала при изменении ориентации БПЛА.

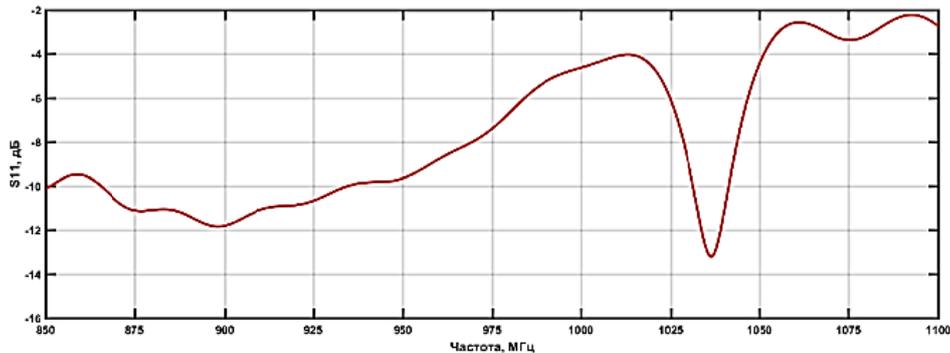


Рис. 3. Коэффициент отражения (S_{11})

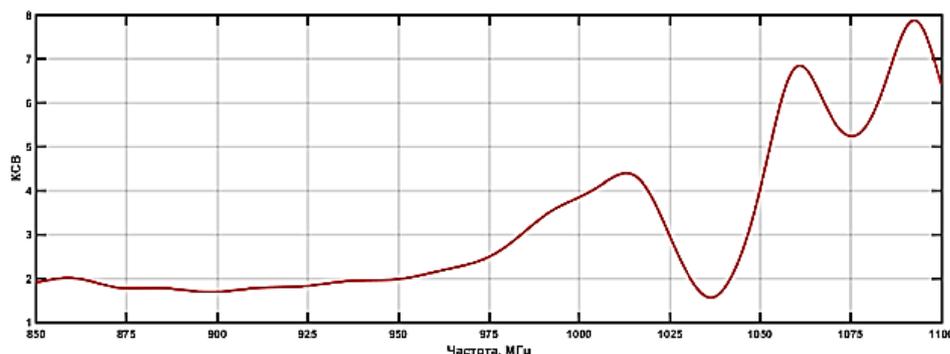


Рис. 4. Коэффициент стоячей волны (КСВ)

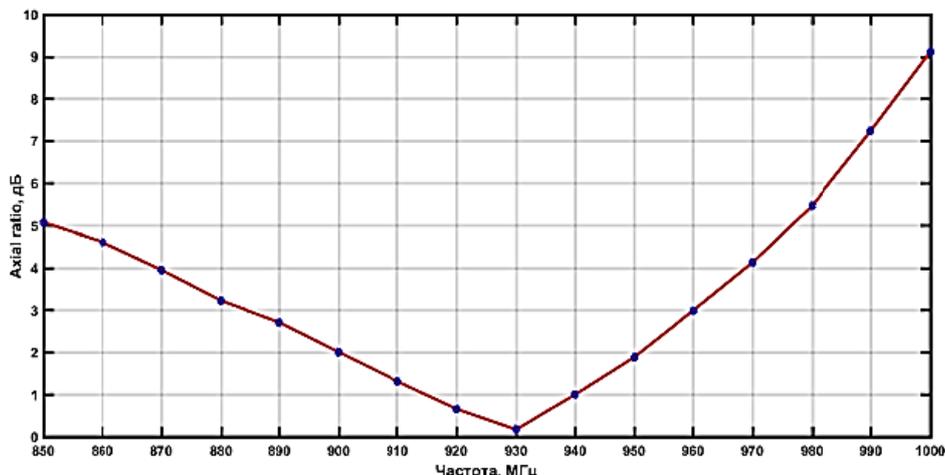


Рис. 5. Коэффициент эллиптичности (Axial Ratio)

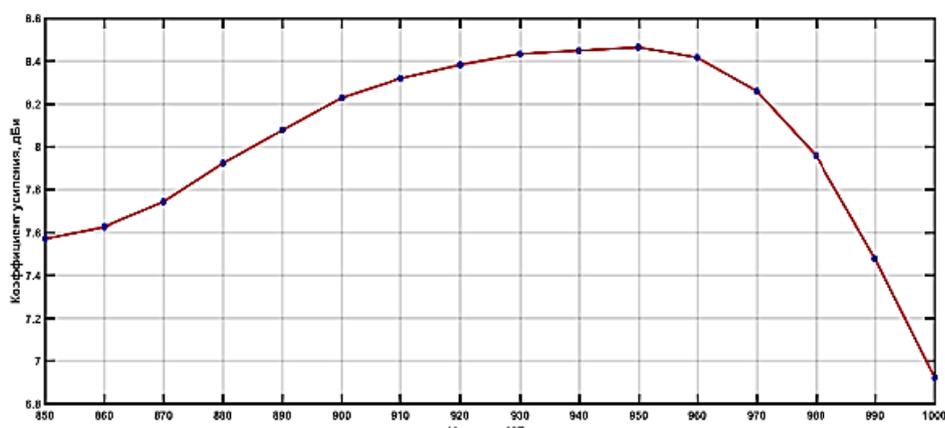


Рис. 6. Коэффициент усиления (КУ)

3) Коэффициент усиления (КУ)

Моделирование показало, что коэффициент усиления антенны (рис. 6) в рабочей полосе частот составляет более 8 дБи, что является хорошим результатом для данного типа антенн. Данный КУ позволяеткратно увеличить дальность связи и улучшить качество сигнала по сравнению со штатными антеннами.

4) Диаграммы направленности

Диаграммы направленности антенны (рис. 7) демонстрируют равномерное излучение в горизонтальной плоскости, что важно для обеспечения устойчивой связи при различных углах наклона БПЛА. Наблюдается небольшое отклонение в вертикальной плоскости, однако оно не оказывает значительного влияния на общую производительность антенны.

Результаты моделирования подтвердили, что разработанная патч-антенна с круговой поляризацией соответствует всем предъявляемым требованиям. Она обеспечивает стабильную работу в диапазоне 900–950 МГц, обладает высоким коэффициентом усиления и хорошими

характеристиками круговой поляризации. Это делает её перспективным решением для использования в системах управления БПЛА, особенно в условиях, где важны дальность связи и устойчивость к помехам.

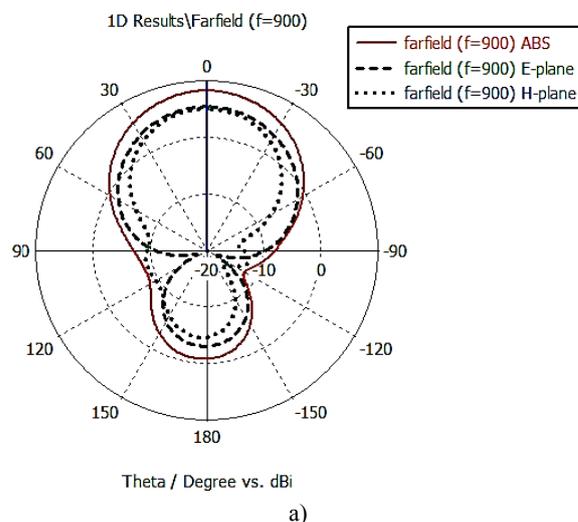


Рис. 7. Диаграммы направленности: а) на частоте 900 МГц; б) на частоте 930 МГц; в) на частоте 950 МГц

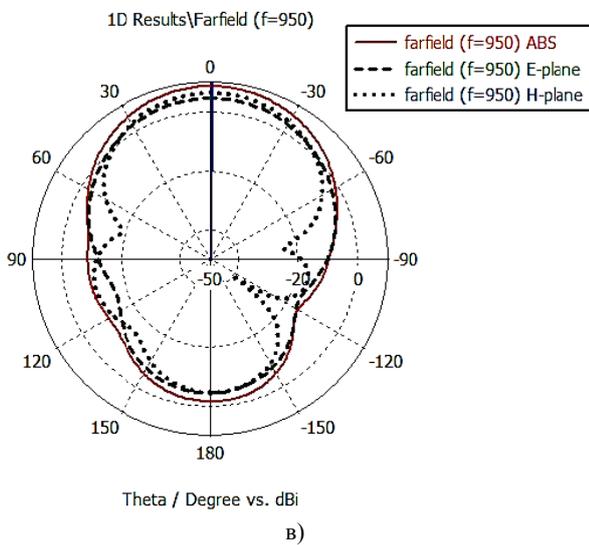
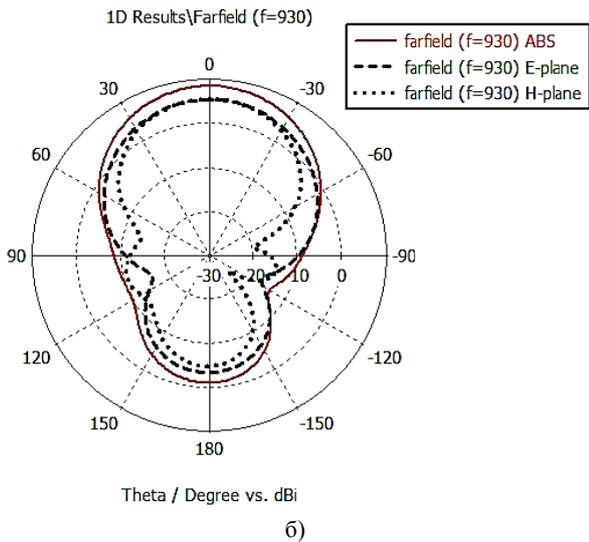


Рис. 7. Диаграммы направленности: а) на частоте 900 МГц; б) на частоте 930 МГц; в) на частоте 950 МГц (окончание)

Изготовление макета и экспериментальные исследования

По рассчитанной модели был изготовлен макет патч-антенны с круговой поляризацией (рис. 8).

Экспериментальные данные коэффициента отражения S_{11} и коэффициента стоячей волны были получены при помощи векторного анализатора цепей (VNA) ZVL-13 компании Rohde & Schwarz.

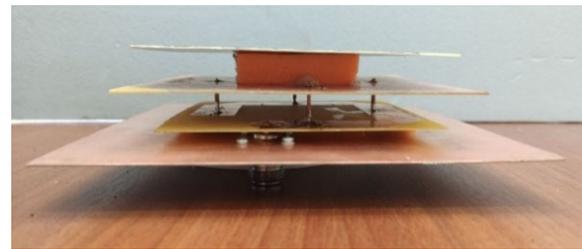
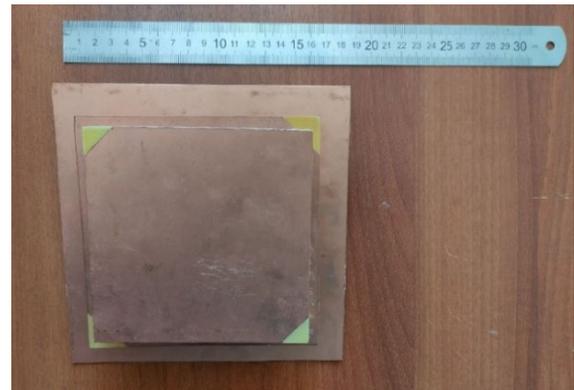


Рис. 8. Макет низкопрофильной патч-антенны

Сравнение смоделированных и экспериментальных характеристик коэффициента отражения (S_{11}) (рис. 9) и коэффициента стоячей волны (КСВ) (рис. 10) подтвердило работоспособность разработанной патч-антенны в целевом диапазоне 900 – 950 МГц.

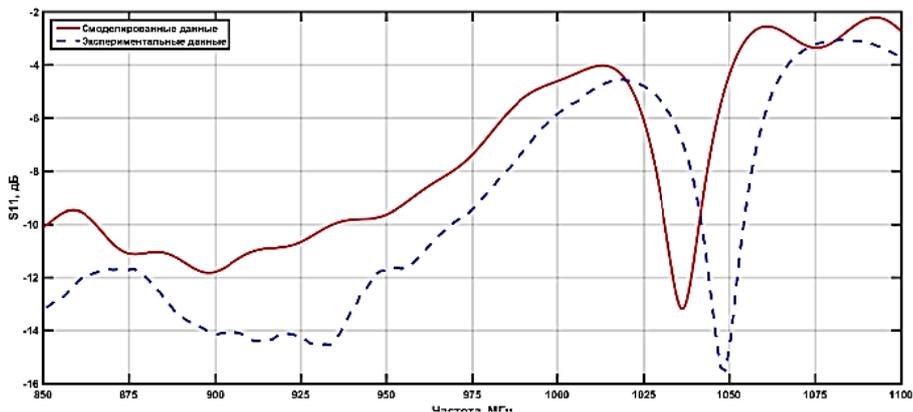


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения (S_{11}) от частоты: расчётные и измеренные данные

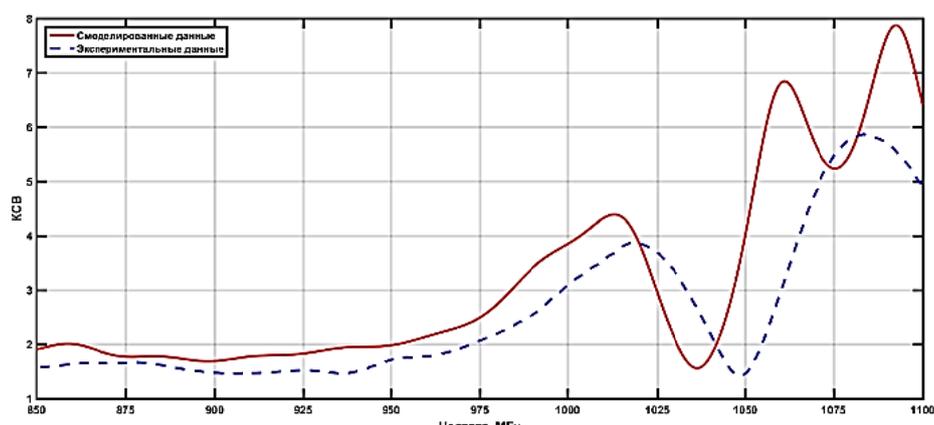


Рис. 10. Зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты: расчётные и измеренные данные

Заключение

В данной работе была успешно разработана, смоделирована и экспериментально исследована низкопрофильная патч-антенна с круговой поляризацией для диапазона частот 900–950 МГц, предназначенная для систем управления БПЛА. Ключевые результаты работы включают:

1) Проектирование антенны:

- Оптимизирована конструкция антенны с многослойной структурой и многоточечной схемой питания, обеспечивающая стабильную круговую поляризацию.
- Использование стеклотекстолита FR-4 позволило достичь баланса между механической прочностью, легкостью и электромагнитными характеристиками.

2) Результаты моделирования:

- Коэффициент отражения (S_{11}) превышает уровень -10 дБ лишь на краю диапазона, а КСВ остаётся в пределах 2.5 в рабочем диапазоне.
- Коэффициент эллиптичности (Axial Ratio) не превышает уровня 2 дБ, что подтверждает высокое качество круговой поляризации.
- Коэффициент усиления (КУ) составляет более 8 дБи, что значительно улучшает даль-

ность связи по сравнению с традиционными антеннами.

3) Экспериментальные исследования:

- Изготовленный макет антенны продемонстрировал хорошее соответствие с результатами моделирования, с незначительными отклонениями, обусловленными технологическими погрешностями.
- Измеренные значения S_{11} и КСВ подтвердили эффективность антенны в целевом диапазоне частот.

Таким образом, предложенная конструкция низкопрофильной патч-антенны соответствует современным требованиям к системам управления БПЛА и может быть успешно применена в реальных условиях.

Литература

1. Эксплуатация и применение беспилотных летательных аппаратов (FPV-дронов): учебное пособие / А.В. Ананьев [и др.]. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2023. 235 с.
2. Ротхаммель К. Антенны. СПб.: Изд-во «Бояныч», 1998. 656 с.
3. Steven G., Luo Q., Zhu F. Circularly polarized antennas. University of Kent, 2014
4. Банков С.Е. Антенны спутниковых навигаторов. М.: Перо, 2014. 693 с.

Поступила 10.06.2025; принята к публикации 28.08.2025

Информация об авторах

Веселов Егор Юрьевич – аспирант кафедры радиотехника и радиосистемы, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87), e-mail: viesielov.1998@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5451-2714>

DEVELOPMENT OF A LOW-PROFILE CIRCULARLY POLARIZED PATCH ANTENNA FOR THE 900 – 950 MHZ FREQUENCY RANGE FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE CONTROL SYSTEMS

E.Yu. Veselov

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

Abstract: this article presents the development of a low-profile circularly polarized patch antenna operating in the 900–950 MHz frequency range for unmanned aerial vehicle (UAV) control systems. The antenna, designed with a multi-point feeding network on an FR-4 substrate, was optimized in CST Microwave Studio under the following criteria: VSWR ≤ 2.5 and axial ratio ≤ 2 dB. Simulation results demonstrate a reflection coefficient (S_{11}) < -10 dB, Gain > 8 dBi, and stable radiation patterns in both vertical and horizontal planes. Experimental studies of the fabricated prototype confirmed alignment with simulated data. Measurements using a Rohde & Schwarz ZVL-13 vector network analyzer revealed minor deviations attributable to manufacturing tolerances. The scientific novelty lies in the optimized design achieving high gain and stable axial ratio across the target frequency band. Results validate the antenna’s potential for enhancing control channel reliability in commercial and specialized UAV systems

Key words: patch antenna, low-profile antenna, circular polarization, UAV control

References

1. Anan’ev A.V. et al. “Operation and application of unmanned aerial vehicles (FPV drones)” (“Ekspluatatsiya i primeneniye bespilotnykh letatel’nykh apparatov (FPV-dronov)”), textbook, Voronezh, 2023, 235 p.
2. Rotkhammel K. “Antennas”, St. Petersburg: Boyanych, 1998, 656 p.
3. Steven G., Luo Q., Zhu F. “Circularly polarized antennas”, University of Kent, 2014, 323 p.
4. Bankov S.E. “Satellite navigation antennas” (“Antenny sputnikovykh navigatorov”), Moscow: Pero, 2014, 693 p.

Submitted 10.06.2025; revised 28.08.2025

Information about the author

Egor Yu. Veselov, graduate student, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (87 Gorkogo str., Vladimir 600000, Russia), e-mail: vieselov.1998@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5451-2714>

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ РАБОТЫ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ЦИФРОВЫМИ ИНТЕРФЕЙСАМИ

О.Н. Чирков, А.С. Костюков, А.П. Хрипунков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается актуальность проектирования печатных плат (ПП) с высокоскоростными цифровыми интерфейсами: PCI Express (высокоскоростная шина обмена данными), USB 3.0 (стандарт передачи информации до 5 Гбит/с), Ethernet (протокол, управляющий процессами передачи данных по локальной сети) и DDR (Double Data Rate - тип памяти в современных ОЗУ, который обеспечивает удвоенную скорость передачи данных), в условиях стремительного развития технологий и увеличения скорости передачи данных. Подчеркивается важность этих интерфейсов для современных электронных устройств, от персональных компьютеров до мобильных и встраиваемых систем. Основное внимание уделяется методикам проектирования, направленным на обеспечение сигнальной целостности и минимизацию потерь, а также выбору материалов и оптимизации топологии ПП. Рассматриваются аспекты энергопотребления и электромагнитной совместимости, а также требования к интерфейсам в контексте развития технологий 5G и Интернета вещей (IoT). Рассматриваются ключевые аспекты проектирования многослойных печатных плат с высокоскоростными цифровыми интерфейсами, акцентируется внимание на роли опорных плоскостей питания и земли. Подчеркивается важность максимального покрытия плоскостями всей поверхности платы для снижения индуктивности и повышения емкости, что уменьшает уровень помех. Описывается процесс проектирования в среде Altium Designer, включая расчет волнового сопротивления и моделирование в HyperLynx. Представлена новая методика проектирования, учитывающая современные требования и материалы, что позволяет улучшить характеристики плат и повысить их производительность. Методика применима для различных высокоскоростных интерфейсов и обеспечивает соответствие стандартам и минимизацию рисков

Ключевые слова: печатная плата, высокоскоростной цифровой интерфейс, передача данных, методика, электромагнитная совместимость

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

В условиях стремительного развития технологий и увеличения скорости передачи данных актуальность проектирования печатных плат (ПП) с высокоскоростными цифровыми интерфейсами возрастает с каждым днем. Высокоскоростные интерфейсы, такие как PCI Express, USB 3.0, Ethernet и DDR (Double Data Rate), становятся стандартом в современных электронных устройствах, начиная от персональных компьютеров и серверов до мобильных устройств и встраиваемых систем. Эти интерфейсы обеспечивают высокую пропускную способность и минимальные задержки, что критически важно для современных приложений, требующих быстрого обмена данными.

Актуальность работы обусловлена несколькими факторами. Во-первых, с каждым годом увеличивается объем данных, которые передаются между устройствами, что создает необходимость в более эффективных и быстрых решениях. Например, в индустрии компьютер-

ных технологий интерфейсы PCI Express используются для соединения графических карт, твердотельных накопителей SSD (Solid State Drive) и других компонентов, где скорость передачи данных играет ключевую роль в производительности системы. В мобильных устройствах USB 3.0 обеспечивает быстрое подключение периферийных устройств, таких как флеш-накопители и внешние накопители. В то же время интерфейсы DDR широко применяются в памяти компьютеров и мобильных телефонов, что подчеркивает их важность в обеспечении высокой скорости доступа к данным.

Во-вторых, современные требования к минимизации энергопотребления и размерам устройств заставляют проектировщиков учитывать не только скорость передачи, но и электроэкономичность. С каждым новым поколением интерфейсов наблюдается не только увеличение скорости, но и снижение потребления энергии, что особенно актуально для мобильных и встраиваемых решений.

В-третьих, развитие технологий 5G и Интернета вещей (IoT) требует создания надежных и высокопроизводительных интерфейсов, что

ставит новые вызовы перед инженерами. Появление новых приложений и сервисов, таких как потоковое видео в высоком разрешении и автономные устройства, создает спрос на интерфейсы с высокой пропускной способностью и низкими задержками.

Одной из основных задач проектирования ПП является минимизация потерь сигнала и искажений, которые могут существенно повлиять на функциональность и стабильность работы цифровых систем. Неправильное проектирование может привести к задержкам, ошибкам передачи данных и другим проблемам, что подчеркивает важность разработки методик, учитывающих специфику высокоскоростных интерфейсов, в том числе DDR. Например, при проектировании ПП с использованием DDR важно учитывать правила маршрутизации и согласования импеданса, чтобы избежать проблем с целостностью сигнала.

Цель данной работы заключается в разработке методики проектирования ПП для работы с высокоскоростными цифровыми интерфейсами. Основное внимание будет уделено размещению компонентов, оптимизации топологии печатной платы, выбору материалов, которые позволят повысить производительность и надежность устройств.

Методика проектирования печатных плат с высокоскоростными интерфейсами

За основу для данной методики были использованы методики по проектированию Ethernet и DDR (Double Data Rate). Данные методики не дают информации инженеру по ключевым моментам и возможным ошибкам при проектировании. Информация, предоставленная в них, ограничивается рекомендациями производителями используемых микросхем и стандартами. В связи с чем в данной методике предлагаем рассмотреть важные аспекты при проектировании ПП с высокоскоростными цифровыми интерфейсами.

Было решено добавить подбор материалов для ПП и рекомендации к ним, а также рекомендации по размещению компонентов, которые позволят избежать ухудшения электрических характеристик.

Рассматриваются ключевые моменты по разработке топологии с учётом самых распространённых ошибок, что позволит избежать проблем с электромагнитной совместимости и обеспечит работоспособность интерфейсов в связи с жесткими требованиями к ним.

Данная методика предлагается к использованию начинающим инженерам (рис. 1).

Методика не учитывает программные комплексы, в которых будут произведены разработки ПП и их моделирование. Это решение всегда остаётся за инженером и его возможностями.

Целью методики проектирования печатных плат с высокоскоростными интерфейсами является создание надежных и эффективных печатных плат, способных обеспечивать передачу данных с высокой скоростью и минимальными потерями.

В современном мире электроники высокоскоростные цифровые интерфейсы играют ключевую роль в обеспечении эффективной работы различных устройств. От персональных компьютеров до серверных систем и мобильных устройств, эти интерфейсы обеспечивают быструю передачу больших объемов данных. В качестве примеров таких интерфейсов часто выступают Ethernet и DDR3. Ethernet — это стандартный сетевой протокол для передачи данных между устройствами в сети. Существуют разные стандарты Ethernet, отличающиеся скоростью передачи данных: Fast Ethernet (100 Мбит/с), Gigabit Ethernet (1 Гбит/с), 10 Gigabit Ethernet (10 Гбит/с) и более высокие [1]. DDR3 — это стандарт интерфейса для оперативной памяти (ОЗУ), который используется в компьютерах и других электронных устройствах. DDR3 обеспечивает высокую скорость передачи данных между процессором и памятью [2].

Проектирование печатных плат (ПП) с такими высокоскоростными интерфейсами представляет собой сложную задачу, связанную с необходимостью учитывать множество факторов, влияющих на целостность сигнала и надежность работы устройства. За основу предлагается взять методику разработки топологии для Ethernet контроллеров.

Основные этапы при проектировании печатных плат с высокоскоростными интерфейсами:

1. Анализ требований;
2. Выбор материала печатной платы;
3. Определение структуры слоев;
4. Размещение компонентов;
5. Трассировка;
6. Проверка и моделирование;
7. Выбор технологий нанесения покрытия.

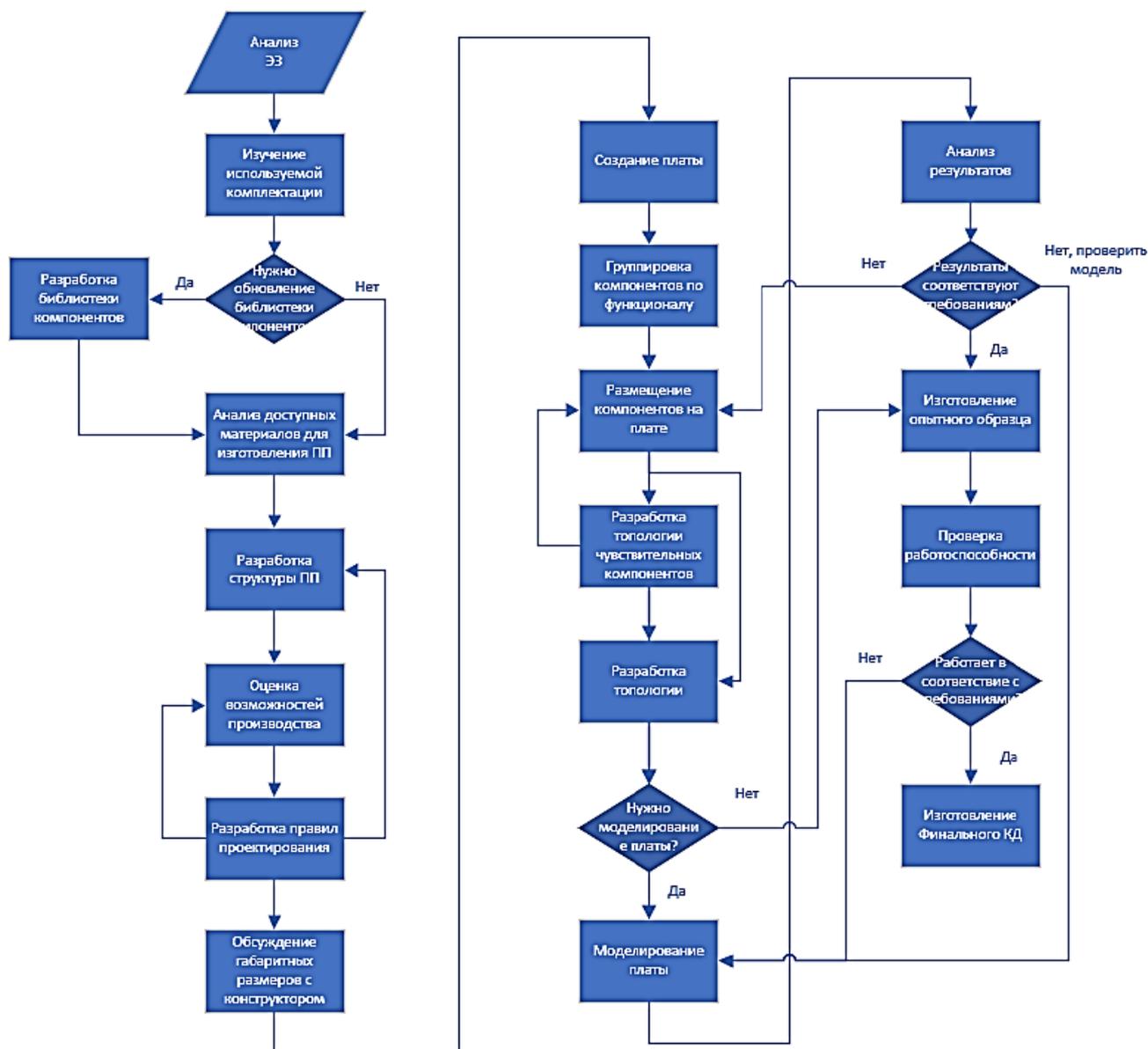


Рис. 1. Алгоритм разработанной методики проектирования печатных плат с высокоскоростными интерфейсами

Анализ требований

Основные требования:

- основные требования к плате;
- функции устройства;
- частота работы;
- требования по механике.

Перед началом разработки печатной платы (ПП) необходимо ознакомиться с техническим заданием (ТЗ) к устройству (ПП), принципиальной схемой и конструкцией готового изделия. Данный этап позволит нам точно узнать, с чем именно необходимо работать. Мы соберем информацию по каждой микросхеме и сможем детально узнать, что и где необходимо применить.

Важно при рассмотрении схемы отметить все чувствительные, высокочастотные компоненты к которым предъявляются особые требования по разводке.

В методике-образце приводится разработка топологии высокоскоростного интерфейса Ethernet, следуя этому, мы также будем рассматривать данный интерфейс.

Также необходимо учитывать технические требования к расположению компонентов (например, чипы памяти DDR, сетевые контроллеры Ethernet, процессоры, FPGA компоненты (с программируемой пользователем вентильной матрицей)). Необходимо ознакомиться с релевантными стандартами IPC (стандарт, принятый электронной промышленностью).

ленностью для проектирования, производства печатных плат и сборки электроники) и рекомендациями по проектированию высокоскоростных печатных плат. Важно учесть стандарты для конкретных интерфейсов: например, IEEE 802.3 (семейство технологий пакетной передачи данных Ethernet) и JEDEC (комитет инженерной стандартизации полупроводниковой продукции) для DDR. И рекомендации по разработке ПП от производителя

Необходимо провести исследования производителей печатных плат, какие из производителей печатных плат могут реализовать проект с учетом требований к технологиям изготовления, стоимости и сроков производства. Стоит обратить внимание на возможности производителей для изготовления, по нанесению покрытий, изготовлению многослойных плат и использованию специальных материалов [3].

Выбор материала печатной платы

Одним из ключевых этапов при разработке ПП является выбор материала печатной платы. Так как разные материалы обладают различными характеристиками, такими как диэлектрическая проницаемость, толщина ПП, теплопроводность и т.д.

Диэлектрическая проницаемость материала влияет на скорость распространения сигнала. Для высокоскоростных систем часто используются материалы с низкой диэлектрической проницаемостью. Это позволяет увеличить скорость передачи данных и снизить потери сигнала. Стеклотекстолит с низкой диэлектрической проницаемостью часто используется в высокоскоростных платах. Однако для более критичных приложений могут использоваться специальные материалы с ϵ_r от 2,5 до 3,5, например, PTFE или Rogers, которые обеспечивают более низкие потери сигнала и улучшают характеристики передачи данных на очень высоких частотах.

Материал платы может влиять на уровень потерь сигнала при передаче. Для высокоскоростных плат важно использовать материалы с низкими диэлектрическими потерями ($\tan \delta$).

Материал платы должен иметь достаточную теплопроводность для отвода тепла от компонентов. Это важно для предотвращения перегрева и обеспечения стабильной работы устройства. Для плат с высокой плотностью компонентов могут использоваться материалы с более высокой теплопроводностью, например, алюминиевые платы или платы с медным основанием [4].

Основные материалы печатных плат можно разбить на 3 пункта: Ядро (Core), Препрег (Prepreg), Медный проводящий слой. Для каждого материала из этих 3-х пунктов можно найти их характеристики. Они указываются на сайте производителя печатных плат, если на сайте производителя данные о характеристиках отсутствуют, то можно обратиться напрямую к сайту производителя данных материалов или стандарту.

Рассмотрим основные типы материалов, которые чаще всего используются при производстве ПП.

Ядро является центральным материалом или ключевым, в изготовлении ПП. Стоит выделить, что они также являются самым крупным разделом. Существует большое количество разнообразных ядер, но рассмотрим часто применяемые.

Диэлектрические материалы: FR4 — это относительно недорогой материал с низкими потерями, но для более критичных приложений могут использоваться специальные материалы, например, PTFE или Rogers (с более низким $\tan \delta$).

Отдельно от популярного FR4 стоит выделить материал FR4 High Speed, который был разработан на основе FR4, это оптимизированный материал для использования в высокоскоростных печатных платах, специально для работы с высокими скоростями. Обладает небольшой стоимостью и низкими показателями диэлектрической потери. Данный материал актуален для использования в маршрутизаторах, суперкомпьютерах, приемопередатчиков.

Стандартный FR4 часто не подходит для высокоскоростных приложений из-за следующих особенностей. Стандартный FR4 имеет относительно высокую диэлектрическую проницаемость, что уменьшает скорость сигнала и увеличивает потери, чем специализированный материал для высокоскоростных печатных плат. Может привести к нагреву ПП.

Одним из широко используемых материалов является материал Rogers от компании Rogers Corp, которая разработала ряд материалов, таких как RO4000, RO3000, RO4350, которые широко используются в производстве высокочастотных печатных плат. Эти материалы отличаются низкими потерями при передаче сигналов, высокой термостойкостью, отличной стабильностью на различных частотах и экологически безопасными характеристиками. Они служат основой для различных приложений, включая системы передачи дан-

ных, радары, спутниковые системы и другие высокочастотные устройства.

Материалы Rogers изготавливаются на основе различных диэлектрических композиций, включающих стеклоткани, керамику и гидрокарбоновые смолы, что позволяет оптимизировать их характеристики для конкретных технических задач. Материалы Rogers обладают уникальными электрическими свойствами, которые отличают их от традиционных материалов для печатных плат, таких как FR4.

Материалы Rogers могут иметь различные значения диэлектрической проницаемости, которые варьируются от 2,55 до 10,3, в зависимости от используемой модификации. Это позволяет настраивать их для различных типов схем и уровней импеданса.

Rogers известен низким температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости (Dk), что означает стабильность параметров при изменении температуры. Это критически важно для высокочастотных приложений, где стабильность сигналов играет ключевую роль. Материал обеспечивает низкие потери на уровне 0,002—0,005 (в зависимости от конкретного материала), что существенно повышает эффективность передачи сигналов при высоких частотах. Это особенно важно в приложениях, где минимизация потерь имеет первостепенное значение.

Демонстрирует высокую термостойкость, с температурой стеклования (Tg) выше 280°C. Важно отметить, что материалы Rogers обладают коэффициентом термического расширения, близким к коэффициенту меди, что обеспечивает хорошую размерную стабильность, особенно при использовании в многослойных печатных платах с медными дорожками.

Материалы Rogers могут быть легко интегрированы в процессы производства печатных плат. Они могут быть обработаны стандартными методами для FR4, такими как сверление, фрезеровка, пайка и т. д. Однако, в отличие от традиционных материалов, таких как PTFE (тефлон), материалы Rogers не требуют сложной подготовки отверстий, что значительно упрощает процесс изготовления и снижает затраты на производство.

Для выбора материалов необходимо было произвести анализ требований, если он не был произведен, то необходимо его сделать.

После анализа требований мы можем выбирать материал исходя из требований, которые рассмотрим ниже.

Для высокоскоростной печатной платы важным параметром является скорость пере-

дачи сигнала. Чем выше частота, тем критичнее влияние материала на сигнал. Для сверхвысоких частот (например, в диапазоне гигагерц) требуются материалы с низким диэлектрическим допуском (Dk) и низким коэффициентом потерь (Df).

Материалы должны поддерживать стабильный импеданс на линии передачи сигнала. Важно, чтобы значение диэлектрической проницаемости (Dk) было стабильным при разных частотах. Для высокоскоростных сигналов, например, в 1 Гбит/с и выше, требуется минимизация потерь на передачи и отражений сигнала. Важно учитывать, что материалы с высокой диэлектрической проницаемостью (Dk) могут вызывать задержки сигнала.

Высокоскоростные сигналы создают электромагнитные помехи, которые могут нарушать работу других компонентов. Материалы с хорошими характеристиками в области электромагнитной совместимости (ЭМС), такие как материалы с хорошей проводимостью и экранирующие покрытия, могут уменьшить помехи. В нашем случае, исходя из требований к интерфейсу DDR и Ethernet, можно применить материал FR4 high speed, он является оптимальным для данной ситуации по всем характеристикам и стоимости в том числе. Диэлектрическая постоянная 3.8 является оптимальной при проектировании ПП с интерфейсом DDR3 и Ethernet 1000 Base-T. Тангенс угла потерь 0.006, также удовлетворяет нашим потребностям.

Определение структуры слоев

Разработчику требуется определить количество слоев в печатной плате, учитывая количество сигнальных трасс, слоев земли и других необходимых слоев.

Для высокоскоростных плат с большим количеством сигнальных трасс часто используют многослойные платы с несколькими сигнальными слоями и слоями земли.

Расположение слоев земли ближе к сигнальным слоям помогает уменьшить перекрестные помехи и повысить надежность передачи сигнала. Толщина слоев влияет на характеристики передачи сигнала, на стоимость производства и на механическую прочность платы. Более толстые слои земли обеспечивают лучшее экранирование и снижают потери сигнала, но также увеличивают стоимость платы. Толщина сигнальных слоев также влияет на импеданс трасс и должна быть оптимизирована в соответствии с требованиями проекта.

После анализа схемы мы знаем, что у нас на печатной плате используются компоненты в BGA корпусе с определёнными требованиями и рекомендациями от производителя, вначале будем отталкиваться от этой информации.

Для начала рассмотрим рекомендации по разводке микросхемы приёма/передатчика.

На рис. 2 представлена структура печатной платы. Верхний и нижний слои выполнены из Rogers 4003 с диэлектриком толщиной 8 мил. Остальные слои — FR4. Дизайн платы использует ламинированный материал Rogers для верхнего и нижнего слоев из-за его низкого тангенса потерь на высоких частотах. Земляные плоскости под ламинированным слоем Rogers (слой 2 и слой 9) служат опорными плоскостями

для трассировки линий передачи на внешних поверхностях. Эти слои представляют собой сплошные медные плоскости без разрывов под радиочастотными дорожками. Слои 2 и 9 играют решающую роль в поддержании целостности радиочастотного сигнала и, следовательно, в производительности. Слои 3 и 8 содержат аналоговое питание 1.3 В, питание 3.3 В GPO и питание 1.8 В VDD INTERFACE. Чтобы изолировать радиочастотную секцию от быстрых переходных процессов цифровой секции, цифровые линии расположены на внутренних слоях 5 и 6. Радиочастотные дорожки на внешних слоях должны иметь контролируемое сопротивление для достижения наилучшей производительности.

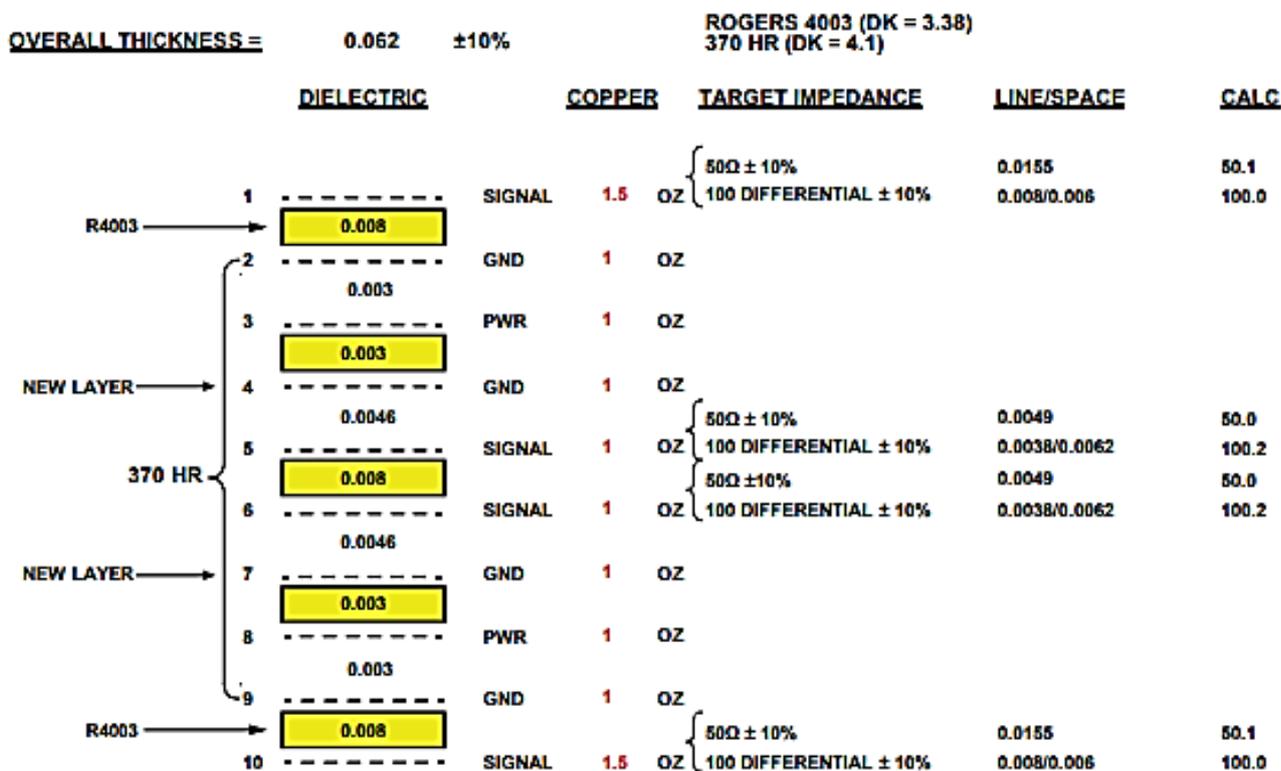


Рис. 2. Рекомендация по структуре слоев микросхемы приемопередатчика

Для всех внутренних слоев этой платы используется медь толщиной 1 унция, тогда как на внешних слоях — 1.5 унции, что делает радиочастотные дорожки менее подверженными отслаиванию. Земляные плоскости на этой плате выполнены из сплошной меди без разрывов, кроме площадок via (примитивный объект дизайна, который используется для формирования вертикального электрического соединения между двумя или более электрическими слоями печатной платы) и компонентов с проходным монтажом. Земляные плоскости должны полностью достигать края печатной

платы под SMA-разъемами для поддержания целостности сигнала. Питания, с другой стороны, могут быть отступы от края платы, чтобы снизить риск короткого замыкания от края.

Благодаря рекомендациям от производителей становится ясно, что для обеспечения высокой производительности для каждого сигнального слоя необходимо обеспечить близость с опорной плоскостью.

Опорная плоскость (слой) — это нечто, способное аккумулировать максимальное количество электрических зарядов, т.е. обладающее высокой емкостью, а также обеспечи-

вать эквипотенциальность на высоких частотах, то есть иметь низкую индуктивность между любыми двумя точками.

Иными словами, необходим проводящий элемент, к которому будут подключены проводники для высокочастотного заземления, и который должен обладать максимально возможными размерами для увеличения емкости и большой площадью для снижения индуктивности. Для описания такого объекта используется термин «опорная плоскость», который более точно передает его функции, поскольку он представляет собой набор эквипотенциальных точек, относительно которых измеряются электрические потенциалы в устройствах. Данный термин будет использоваться в системе заземления печатных плат.

В конструкции многослойных печатных плат опорная плоскость, представлена слоем GND (обозначение заземления в электронике). Однако на высоких частотах также может функционировать и плоскость питания как опорная. В соответствии с требованиями, эти плоскости должны занимать максимальную площадь, то есть охватывать всю поверхность печатной платы. Уменьшение площади медной фольги полигонов питания и GND приводит к увеличению индуктивности и снижению емкости, что, в свою очередь, вызывает рост уровня помех в печатной плате.

Рассмотрим наиболее крупный компонент нашей печатной платы ПЛИС, для этой платы будет использоваться ПЛИС от компании Xilinx. Продукция этой компании обладает достаточно внушительной вспомогательной документацией для разработчиков. С достаточно подробными объяснениями, что является плюсом.

Для ПЛИС Xilinx количество сигналов составляет примерно 60 % от числа шариков BGA. Остальные 40 % — это силовые и земляные сигналы, которые чаще всего прокладываются напрямую к плоскостям через переходные отверстия. Это предполагает полное использование входов/выходов. Если используется меньше I/O, то количество сигналов для маршрутизации соответственно уменьшается.

Благодаря этой информации и зная тип корпуса микросхемы, мы можем рассчитать количество сигнальных слоев для платы, для ПЛИС в корпусе FPGA 676 (рис. 3).

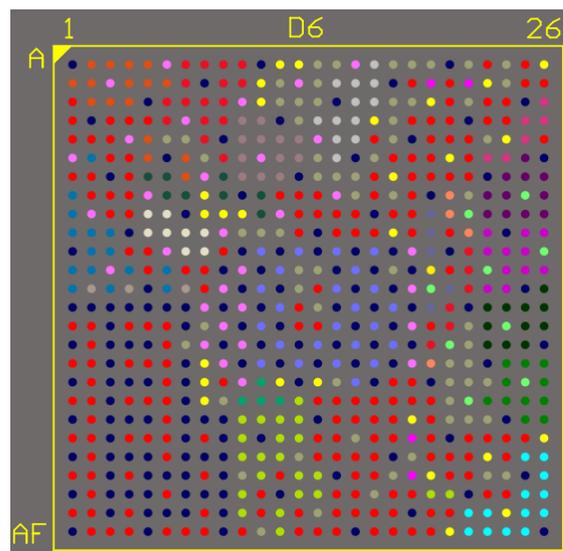


Рис. 3. Посадочное место для FPGA 676

Получаем значение в 4 сигнальных слоя, но стоит учитывать, что при проектировании печатных плат с компонентами в корпусе BGA (тип корпуса поверхностно-монтируемых интегральных микросхем) зачастую внешние слои печатной платы заняты компонентами, самой микросхемой в корпусе BGA, а также конденсаторами и резисторами, следовательно, использование внешних слоев ограничивается.

Размещение плоскостей питания и земли в конструкции печатной платы (порядок слоев) оказывает значительное влияние на паразитные индуктивности путей питания. Порядок слоев должен учитываться на ранних этапах проектирования: слои с высоким приоритетом должны располагаться ближе к чувствительным компонентам, а слои с низким приоритетом должны находиться дальше компонентов [5].

Силовые источники с высоким временным током должны иметь соответствующие плоскости питания близко к верхней поверхности конструкции ПП. Это уменьшает вертикальное расстояние, которое токи проходят, прежде чем достичь соответствующих плоскостей. Чтобы уменьшить индуктивность распространения, каждая плоскость питания должна иметь соседнюю плоскость земли в конструкции ПП. Такой эффект вызывает сильную связь высокочастотных токов, и плоскость земли, соседствующая с определенной плоскостью питания, обычно несет большую часть тока, противоположного току в плоскости питания. Таким образом, соседние плоскости питания и земли рассматриваются как пара.

Не все пары плоскостей питания и земли находятся в верхней половине конструкции ПП, поскольку производственные ограничения обычно требуют симметричной конструкции ПП вокруг центра.

Исходя из уже имеющейся информации для нашего случая, мы можем сказать, что количество слоев будет варьироваться от 12 до 16.

Это аргументировано использованием большого количества микросхем в BGA корпусе, для которых есть специальные требования по выравниванию длин линий данных. Это микросхема ПЛИС и две микросхемы приемопередатчика, а также две микросхемы DDR3.

Структура слоев печатной платы в среде Altium Designer приведена на рис. 4.

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Top Overlay		Overlay				
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01016mm	3.5	
1	Top Layer	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		
	FR12	PP-006	Core		0.1mm	3.51	0.0082
2	GND1	CF-004	Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR	PP-006	Prepreg		0.152mm	3.51	0.02
3	Sig2	CF-004	Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR1	PP-006	Core		0.1mm	3.51	0.0082
4	GND2	CF-004	Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR2	PP-006	Prepreg		0.152mm	3.51	0.02
5	Sig4	CF-004	Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR3	PP-006	Core		0.1mm	3.51	0.0082
6	GND3		Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR10	PP-006	Prepreg		0.152mm	3.51	0.02
7	PWR1	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		
	F11	Core-009	Core		0.1mm	3.51	0.0082
8	PWR2	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		
	FR4	FR-4	Prepreg		0.152mm	3.51	0.02
9	GND4		Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR5	PP-006	Core		0.1mm	3.51	0.0082
10	Sig7	CF-004	Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR6	PP-006	Prepreg		0.152mm	3.51	0.02
11	GND5	CF-004	Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR7	PP-006	Core		0.1mm	3.51	0.0082
12	Sig9	CF-004	Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR8	PP-006	Prepreg		0.152mm	3.51	0.02
13	GND6	CF-004	Signal	1/2oz	0.0175mm		
	FR9	PP-006	Core		0.1mm	3.51	0.0082
14	Bottom Layer	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01016mm	3.5	
	Bottom Overlay		Overlay				

Рис. 4. Структура печатной платы в среде Altium Designer

Теперь, когда у нас есть структура, мы можем предварительно рассчитать волновое сопротивление (импеданс) трасс для 100 Ом, 86 Ом и 50 Ом, это необходимые значения импеданса для корректной работы наших микросхем.

Благодаря встроенному в Altium Designer инструментарию мы можем рассчитать волновое сопротивление без дополнительных инструментов или программ. Все в том же меню со структурой печатной произведем расчёты. Для каждого требуемого волнового сопротивления мы создаем профиль. В большинстве программ для разработки топологии есть возможность созданий правил для трассировки, что в дальнейшем обеспечивает возможность отдельной настройки волнового сопротивления и облег-

чает разработку ПП, все эти правила позволяют не следить за требованиями производителей и требованиям к ПП. В программном обеспечении Altium Designer также есть данная функция.

Волновое сопротивление и стек платы в последующих шагах, возможно, будут изменяться в связи возникающими требованиями производителя или сложностью трассировки ПП. Не стоит также игнорировать экономические вопросы, чем эффективнее и дешевле плата, тем лучше.

Моделирование

Современные электронные устройства требуют передачи сигналов на высоких частотах

тах. Увеличение скорости работы приводит к большей чувствительности к отражениям, задержкам и искажениям [6-8]. Анализ помогает выявить и устранить потенциальные проблемы до производства, обеспечивая стабильность и надежность работы.

С увеличением сложности печатных плат, где используется множество компонентов и сложные соединения, важно анализировать, как эти факторы влияют на целостность сигналов. Объемная трассировка и использование высокоскоростных интерфейсов требуют тщательного анализа.

Современные устройства становятся всё более компактными, что приводит к высокой

плотности размещения компонентов на плате. Это увеличивает риск перекрестных помех и других проблем с целостностью сигналов. Актуальность приведенного анализа заключается в необходимости минимизации этих рисков.

Для проверки работоспособности методики будет проведен анализ печатных плат. Моделирование будет проводиться в программном обеспечении HyperLynx от Mentor Graphics.

Разработка печатных плат велась в программном комплексе Altium Designer, который обладает возможностью экспорта платы в HyperLynx

Проведен анализ цепей (рис. 5).

Data Read

Data Read Worstcases

- To investigate any result further, click on the link in the cell to open the waveforms. Viewing waveforms requires a valid EZwave license.
- Click on the main header (e.g., "Setup" or "Hold") to view more details about how the margin was derived
- Click on the second-level header (e.g., "Margin," "Measurement," or "Pass/Fail") to sort the table by that column

Data Read Worstcases

#	Signal	Signal/DRAM/Controller		Status	Setup		Hold	
		Driving DRAM.Pin	Receiving Controller.Pin		Pass/Fail	Margin [ps]	Margin [ps]	
1	DDR3_D00	D3_U_DDR2.E3	D6_I28	Pass		103.800		103.800
2	DDR3_D01	D3_U_DDR2.F7	D6.F25	Pass		102.700		103.0
3	DDR3_D010	D3_U_DDR2.G8	D6.M28	Pass		100.1		100.900
4	DDR3_D011	D3_U_DDR2.C2	D6.K23	Pass		99.4		98.900
5	DDR3_D012	D3_U_DDR2.A7	D6.M25	Pass		96.9		98.800
6	DDR3_D013	D3_U_DDR2.A2	D6.N24	Pass		100.0		100.800
7	DDR3_D014	D3_U_DDR2.B8	D6.N23	Pass		101.0		100.0
8	DDR3_D015	D3_U_DDR2.A3	D6.M24	Pass		96.9		98.6
9	DDR3_D016	D3_U_DDR1.E3	D6.R28	Pass		96.1		98.800
10	DDR3_D017	D3_U_DDR1.F7	D6.P24	Pass		97.5		98.0
11	DDR3_D018	D3_U_DDR1.F2	D6.N28	Pass		100.0		99.300
12	DDR3_D019	D3_U_DDR1.F8	D6.P23	Pass		96.5		98.0
13	DDR3_D02	D3_U_DDR2.F2	D6.I25	Pass		104.0		103.0
14	DDR3_D020	D3_U_DDR1.H3	D6.T24	Pass		97.300		97.400
15	DDR3_D021	D3_U_DDR1.H8	D6.T25	Pass		101.800		101.400
16	DDR3_D022	D3_U_DDR1.G2	D6.T23	Pass		98.700		98.900
17	DDR3_D023	D3_U_DDR1.H7	D6.R23	Pass		96.9		98.0
18	DDR3_D024	D3_U_DDR1.D7	D6.V24	Pass		96.6		98.400
19	DDR3_D025	D3_U_DDR1.C3	D6.L28	Pass		96.1		96.5
20	DDR3_D028	D3_U_DDR1.C8	D6.L24	Pass		96.5		98.700
21	DDR3_D027	D3_U_DDR1.C2	D6.L25	Pass		96.4		98.900
22	DDR3_D028	D3_U_DDR1.A7	D6.W26	Pass		96.0		97.200
23	DDR3_D029	D3_U_DDR1.A2	D6.Y25	Pass		96.6		98.900
24	DDR3_D03	D3_U_DDR2.F8	D6.G28	Pass		103.6		102.800
25	DDR3_D030	D3_U_DDR1.B8	D6.Y28	Pass		96.5		100.200
26	DDR3_D031	D3_U_DDR1.A3	D6.W23	Pass		96.5		99.200
27	DDR3_D04	D3_U_DDR2.H3	D6.H26	Pass		104.4		105.100
28	DDR3_D05	D3_U_DDR2.H8	D6.H23	Pass		104.0		103.200
29	DDR3_D06	D3_U_DDR2.G2	D6.J24	Pass		102.700		103.0
30	DDR3_D07	D3_U_DDR2.H7	D6.I23	Pass		102.700		101.900
31	DDR3_D08	D3_U_DDR2.D7	D6.K26	Pass		96.5		96.5
32	DDR3_D09	D3_U_DDR2.C3	D6.L23	Pass		96.5		99.0

Рис. 5. Отчет анализа цепей печатной платы в HyperLynx

Можно увидеть, что наша топология прошла анализ цепей успешно. Требования стандарта DDR выполнены, и плату можно запускать в производство.

Заключение

Разработана новая методика проектирования печатных плат с высокоскоростными

цифровыми интерфейсами. Эта методика учитывает современные требования, материалы и подходы, что позволяет улучшить характеристики плат и повысить их производительность. Методика включает в себя все этапы проектирования топологии ПП. Это позволяет учесть все аспекты работы устройства, минимизировать риски и обеспечить более эффективный процесс разработки. Методика учитывает важ-

ные аспекты топологии, которые влияют на работу высокоскоростных интерфейсов. Благодаря им не будет возникать проблем с задержкой, отражением, перекрестными помехами и электромагнитной совместимостью. Это позволяет устранить большинство проблем, связанных с передачей данных на высоких скоростях.

Методика пригодна для проектирования плат с разными типами высокоскоростных интерфейсов, таких как PCIe, DDR, USB, Ethernet и др. [8, 9, 10]. Она позволяет учесть специфику каждого стандарта и обеспечить соответствие требованиям.

Литература

1. IEEE 802.3-2018. Электронные данные. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/7071/> (дата обращения: 15.01.2025).
2. JESD79F. Электронные данные. URL: <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-79-2e> (дата обращения: 07.02.2025)
3. Сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах в САПР Altium Designer 6:

учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. Ч. 1. 148 с.

4. Труднов А.В. Высокоскоростные печатные платы. Примеры применения правил сохранения целостности электрических сигналов и электропитания. Издательские решения, 2022. 105 с.

5. UltraScale Architecture PCB Design. Электронные данные. URL: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ug583-ultrascale-pcb-design> (дата обращения: 15.01.2025).

6. Чирков О.Н. Оценка пропускной способности высокоуровневых видов модуляции m-qam // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 6. С. 12-13.

7. Чирков О.Н., Ромашенко М.А., Бобылкин И.С. Эффективный метод моделирования систем беспроводной связи // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 8. С. 110-115.

8. Хорошайлова М.В., Чернышов А.В., Леденев Д.А. Методика программирования микроконтроллера MDR32F9Q2I в задачах управления и мониторинга // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 2. С. 76-81.

9. Methods for analyzing the reliability of mounting microelectronic radio components / A.S. Kostyukov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. «International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021». 2021. 2032 (1). 012115.

10. Костюков А.С. Метод определения параметров качества электронного средства // Радиотехника. М. 2023. Т. 8. № 8. С. 49-53.

Поступила 20.12.2024; принята к публикации 17.02.2025

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Костюков Александр Сергеевич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

Хрипунков Александр Павлович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kipr@vorstu.ru

METHODOLOGY OF DESIGNING PRINTED CIRCUIT BOARDS FOR WORKING WITH HIGH-SPEED DIGITAL INTERFACES

O.N. Chirkov, A.S. Kostyukov, A.P. Khripunkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the relevance of designing printed circuit boards (PCBs) with high-speed digital interfaces is considered: PCI Express (high-speed data bus), USB 3.0 (information transmission standard up to 5 Gbit/s), Ethernet (protocol controlling data transmission processes over a local network) and DDR (Double Data Rate - memory type in modern RAM, which provides double the data transfer rate), in the context of rapid technology development and increasing data transfer speeds. We emphasize the importance of these interfaces for modern electronic devices, from personal computers to mobile and embedded systems. The main focus is on design techniques aimed at ensuring signal integrity and minimizing losses, as well as the choice of materials and optimization of the topology of the PCB. We considered the aspects of energy consumption and electromagnetic compatibility, as well as interface requirements in the context of the development of 5G technologies and the Internet of Things (IoT). We considered the key aspects of the design of multilayer printed circuit boards with high-speed digital interfaces, focusing on the role of the reference planes of power supply and earth. We emphasize the importance of maximum plane coverage of the entire surface of the board in order to reduce inductance and increase capacitance, which reduces the level of interference. We described the design process in the Altium Designer environment, including the calculation of wave resistance and modeling in HyperLynx. We presented a new design methodology that takes into account modern requirements and materials, which allows to improve the characteristics of the boards and increase their productivity. The technique is applicable for various high-speed interfaces, ensuring compliance with standards and minimizing risks

Key words: printed circuit board, high-speed digital interface, data transmission, methodology, electro-magnetic compatibility

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZGM-2025-0002)

References

1. IEEE 802.3-2018, available at: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/7071/> / (date of access: 15.01.25)
2. JESD79F, available at: <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-79f> (date of access: 07.02.25)
3. “End-to-end design of RES functional units on printed circuit boards in Altium Designer CAD 6” (“Skvozhnoe proektirovanie funktsional'nykh uzlov RES na pechatnykh platakh v SAPR Altium Designer 6”), textbook, St. Petersburg: Publishing house of SPbSETU “LETI”, 2008, 148 p.
4. Trundov A.V. “High-speed printed circuit boards. Examples of the application of rules for maintaining the integrity of electrical signals and power supply” (“Vysokoskorostnye pechatnye platy. Primery primeneniya pravil sokhraneniya tselostnosti elektricheskikh signalov i elektropitaniya”), Publishing solutions, 2022, 105 p.
5. UltraScale Architecture PCB Design, available at: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ug583-ultrascale-pcb-design> (date of access: 15.01.25)
6. Chirkov O.N. “Estimation of the bandwidth of high-level types of m-qam modulation”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 6, pp. 12-13.
7. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S. “An effective method for modeling wireless communication systems”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2023, vol. 87, no. 8, pp. 110-115.
8. Khoroshailova M.V., Chernyshov A.V., Ledenev D.A. “The methodology of programming the MDR32F9Q2I microcontroller in control and monitoring tasks”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 76-81.
9. Kostyukov A.S., Bashkirov A.V., Glotov V.V., Astakhov N.V., Demikhova A.S. “Methods for analyzing the reliability of mounting microelectronic radio components”, *Journal of Physics: Conference Series. "ITBI 2021"*, no. 2032 (1), article no. 012115.
10. Kostyukov A.S. “Method for determining the quality parameters of an electronic device”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2023, vol. 8, no. 8, pp. 49-53.

Submitted 20.12.2024; revised 17.02.2025

Information about the authors

Oleg N. Chirkov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Aleksandr S. Kostyukov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

Aleksandr P. Khrpunkov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru

О ВЛИЯНИИ ПОРЯДКА ВЫПОЛНЕНИЯ КОНЦЕНТРАТОРОВ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ ЛИСТОВЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ОКИСЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮА.Б. Коломенский¹, С.В. Шахов², Б.А. Коломенский², И.И. Емельянов²¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Филиал ПАО «Ил» - ВАСО, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в процессе технологического процесса изготовления изделий из титановых сплавов при нагреве формируются интерференционно окрашенные оксидные плёнки, а при температурах выше 550 °С начинается диффузия кислорода в металл с образованием газонасыщенных слоёв, что потенциально оказывает воздействие на эксплуатационные характеристики деталей, особенно при динамических нагрузках. Реальные конструкции практически всегда имеют геометрические концентраторы - отверстия, радиусы и т.п., что в совокупности с поверхностным окислением и газонасыщением может оказывать существенное влияние на эксплуатационную долговечность изделий. В литературе не освещается вопрос о влиянии очередности выполнения концентраторов на сопротивляемость титановых листовых деталей динамическим нагрузкам. Исследовано влияние очередности выполнения концентраторов на показатели циклической долговечности и ударной вязкости листовых титановых сплавов с окисленной поверхностью, сформировавшейся в процессе отжига. Выявлено, что выполнение концентраторов после отжига при температурах до 550 °С даёт большие значения ударной вязкости титановых листов, чем при выполнении концентраторов до отжига. Это связано с удалением оксидов с боковых поверхностей надрезов, что повышает работу образования трещины. Для более высокой температуры отжига, при которой начинается процесс формирования газонасыщенного слоя, преимущество имеет вариант с предварительным нанесением концентратора

Ключевые слова: титановые сплавы, отжиг, оксидные плёнки, ударная вязкость, циклическая долговечность

Введение

Известно, что в процессе технологического процесса изготовления изделий из титановых сплавов при нагреве формируются интерференционно окрашенные оксидные плёнки, а при температурах выше 550 °С начинается диффузия кислорода в металл с образованием газонасыщенных слоёв, что потенциально оказывает воздействие на эксплуатационные характеристики деталей, особенно при динамических нагрузках [1].

Реальные конструкции практически всегда имеют геометрические концентраторы – отверстия, радиусы и т.п., что в совокупности с поверхностным окислением и газонасыщением может оказывать существенное влияние на эксплуатационную долговечность изделий. В литературе не освещается вопрос о влиянии очередности выполнения концентраторов – до или после формирования окисных плёнок – на сопротивляемость титановых листовых деталей динамическим нагрузкам.

Постановка задачи

Задачей настоящей работы является исследование влияния порядка выполнения геометрических концентраторов в технологическом процессе изготовления на ударную вязкость и повторно-статическую долговечность листовых конструкций из титановых сплавов с окисленной поверхностью.

Материалы и методы исследования

Для экспериментов использовали широко применяемые при создании элементов летательных аппаратов листы низкопрочного пластичного технического титана ВТ1-0, титанового сплава средней прочности ОТ4 и высокопрочного сплава ВТ6ч.

Из листов толщиной 1,2 мм изготавливали образцы для испытаний на ударную вязкость КСУ и образцы для повторно-статического растяжения (рис. 1).

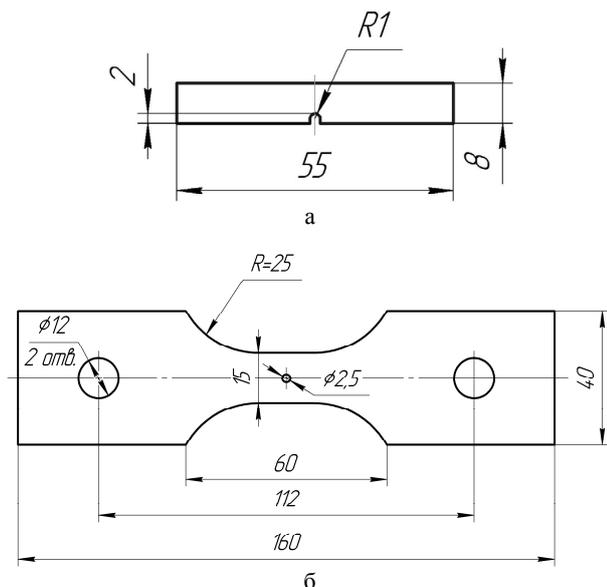


Рис. 1. Образцы для испытаний: на ударную вязкость (а) и повторно-статическое растяжение (б)

После изготовления образцы подвергали предварительному высокотемпературному воздушному отжигу по режимам 800 °С, 2 ч. (технический титан ВТ1-0 и сплав ОТ4) и 850 °С, 1 ч. (сплав ВТ6ч), при этом происходило полное снятие нагартовки и формирование газонасыщенных слоев ~ 100 мкм (рис. 2).

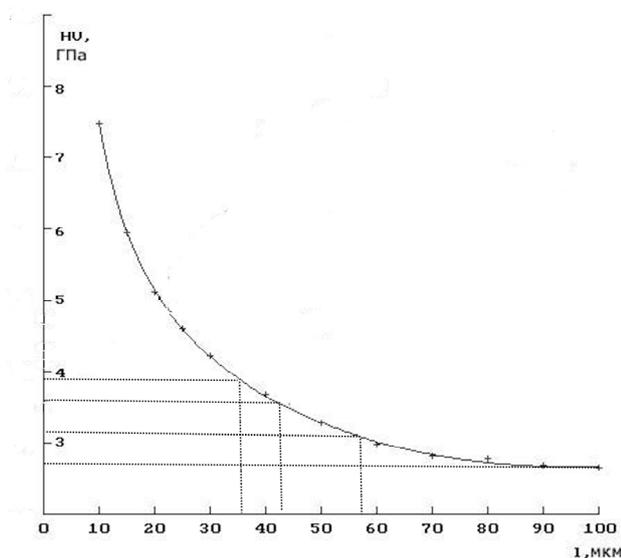


Рис. 2. Зависимость микротвёрдости поверхности образцов из сплава ОТ4 после отжига по режиму 800 °С, 2 ч. от глубины травления. Линиями отмечены глубина травления и соответствующая ей микротвёрдость поверхности

Далее удаляли поверхностную окалину пескоструйной обработкой при избыточном давлении 0,1 МПа и проводили облагораживающее травление в смеси кислот HF и HNO₃:

- для образцов для испытаний на КСУ из титана ВТ1-0 и сплава ВТ6ч на глубину ~ 100 мкм для полного снятия газонасыщенного слоя;

- для образцов на повторно-статическое растяжение из сплава ОТ4 на глубину ~37, 43, 57 и 100 мкм, что обеспечивало получение перепадов микротвёрдости поверхности по отношению к сердцевине ΔHV соответственно ~40, 30, 15 и 0 %.

После этого для образцов из титана ВТ1-0 и сплава ВТ6ч выполняли одночасовой воздушный финишный отжиг в интервале температур 350-650 °С.

Исследовали два варианта очерёдности выполнения геометрических концентраторов – отверстий в усталостных образцах и надрезов в образцах для испытаний на ударную вязкость:

- при изготовлении образцов, до высокотемпературного отжига;

- непосредственно перед механическими испытаниями.

Испытания на ударную вязкость (КСУ) выполняли по ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре со шкалой 5 кг·м. Во избежание деформации листовых образцов при испытании применяли специальное приспособление.

Испытания на повторно-статическое растяжение проводили при частоте $f = 0,8$ Гц, коэффициенте асимметрии цикла $R = +0,1$ и максимальном напряжении цикла $\sigma_{max} = 560$ МПа.

Результаты исследований

На рис. 3 приведены результаты испытаний образцов на ударную вязкость в формате $КСУ=f(T)$.

Следует учитывать, что в процессе сверления боковые поверхности надрезов получают некоторую нагартовку. Сопоставляя КСУ образцов без финишного отжига (с неокисленной поверхностью) обоих типов можно видеть, что воздействие нагартовки малозначительно: для титана ВТ1-0 нагартовка на ~ 8 % снижает КСУ, в то время как для сплава ВТ6 повышает на такую же величину.

Из результатов испытаний следует, что для варианта концентраторов до отжига с ростом T финишного отжига от 350 до 550 °С при увеличении толщины оксидной плёнки КСУ падает, а при $T = 650$ °С, характеризующейся началом заметного растворения кислорода в титане (газонасыщенный слой ~ 8 мкм) – существенно возрастает (рис. 3, а, в). Это характерно для обоих сплавов, ВТ1-0 и ВТ6ч. То есть рост

толщины оксидной плёнки отрицательно влияет на ударную вязкость, а начало растворения кислорода в титане её заметно повышает.

Значение KCU складывается из работы по образованию магистральной трещины A_T и работы по распространению трещины (долому) образца A_D :

$$KCU = A_T + A_D.$$

Для варианта концентраторов после отжига оксидная плёнка на боковых гранях надреза удаляется, а с ростом температуры финишного отжига от 350 до 550 °С показатель KCU растёт (рис. 3, б, г) – по-видимому, за счёт роста A_D .

Сравнивая результаты по обоим вариантам изготовления и учитывая состояние боковых поверхностей образцов в обоих случаях одинаково (они одинаково окислены), можно сделать вывод, что разница для них только в работе по образованию магистральной трещины при ударе A_T ; работа по долому A_D - одинакова.

Таким образом, выполняя концентратор после отжига в диапазоне температур 350-550 °С с удалением оксидов с боковых поверхностей надрезов позволяет избежать снижения работы по образованию трещины A_T и в целом показателя KCU.

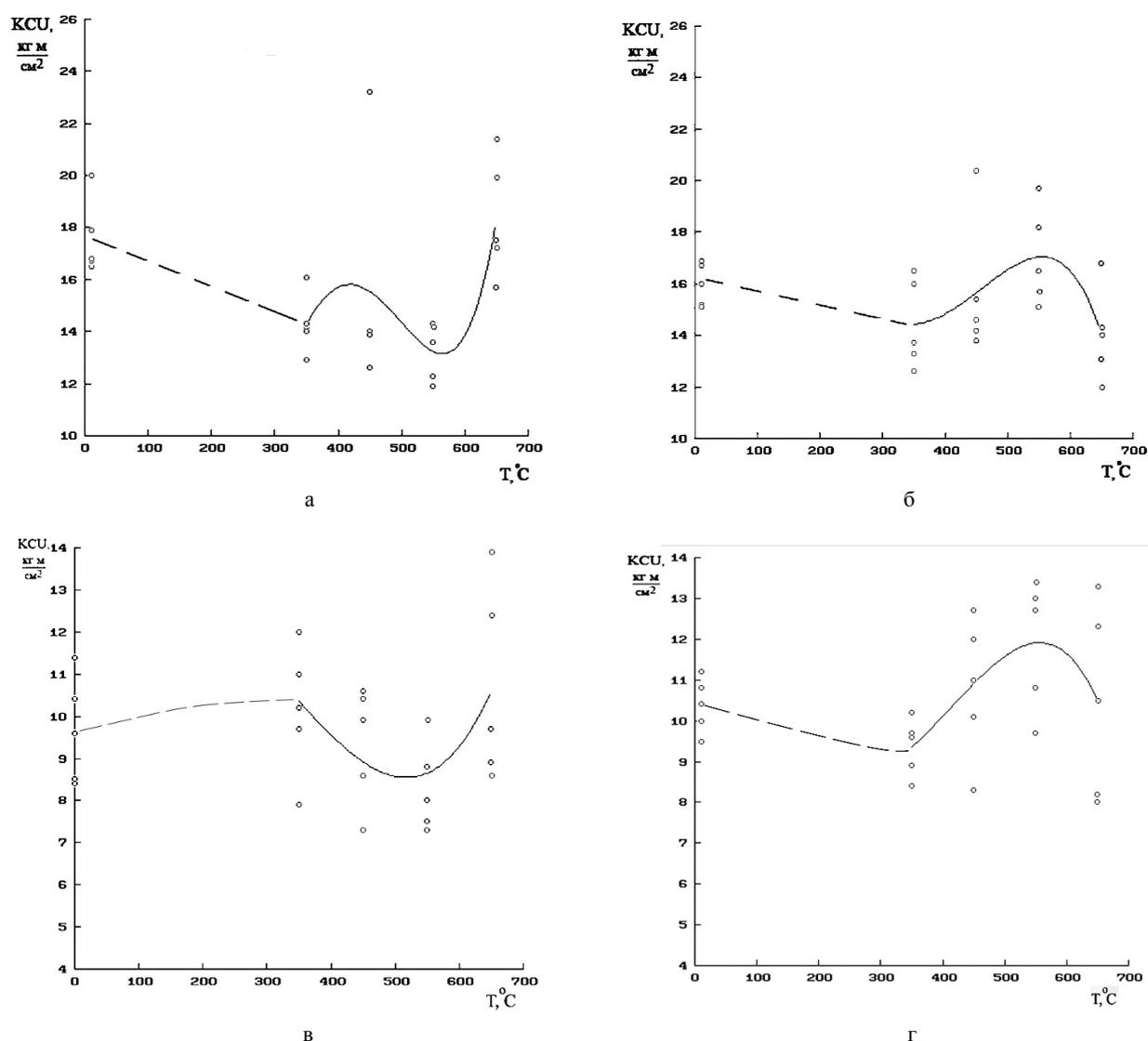


Рис. 3. Зависимости KCU от температуры финишного отжига для титана VT1-0 (а, б) и сплава VT6ч (в, г) для вариантов выполнения отверстий при изготовлении образцов: до высокотемпературного отжига (а, в) и непосредственно перед механическими испытаниями (б, г)

Иной характер воздействия очередности выполнения надрезов наблюдали для температуры $T = 650$ °С.

Значительное снижение KCU для варианта выполнения надреза после отжига может объясняться двумя вероятными причинами. Во-

первых, удаляется упрочнённый кислородом слой. Во-вторых, при нанесении надреза режущим инструментом может повреждаться остающийся на боковых поверхностях газонасыщенный слой с зарождением там микротрещин, которые облегчают образование магистральной трещины.

Выявленную закономерность полезно учитывать при разработке технологического процесса изготовления листовых конструкций. С целью снижения риска снижения КСЧ при температурах отжига не более 550 °С выполнение геометрических концентраторов в конструкциях (отверстий, надрезов) целесообразно выполнять после операции финишного отжига. Если же температура отжига превышает 600 °С и на поверхности начинает формироваться газонасыщенный слой, отверстия и надрезы предпочтительно выполнять до финишного отжига.

Изучали также влияние очередности выполнения отверстий-концентраторов на повторно-статическую выносливость листов сплава ОТ4 с различным уровнем газонасыщения, характеризуемым различными значениями перепада микротвёрдости поверхности ΔHV .

Результаты испытаний представлены на рис. 4.

Видно, что при данном виде испытаний нагартовка, получаемая при сверлении отверстий-концентраторов, практически не повлияла на циклическую долговечность образцов без газонасыщенного слоя ($\Delta HV = 0$).

Из полученных результатов следует, что небольшие перепады микротвёрдости ($\Delta HV \sim 15\%$) положительно влияют на повторно-статическую выносливость для обоих исследуемых вариантов изготовления – выполнение концентраторов до и после отжига. Причём лучшие результаты приходятся на вариант с отверстиями до отжига.

Поверхности образцов для обоих вариантов имеют одинаковые газонасыщенные слои, а отличие вариантов состоит в наличии (вариант до отжига) либо отсутствии газонасыщения на боковых поверхностях отверстий. Т.е. зарождение усталостных трещин происходит в различных условиях - при наличии или отсутствии газонасыщенных слоёв на боковых поверхностях отверстий, а рост усталостных трещин - в одинаковых условиях.

Следовательно, регламентированные газонасыщенные подслои на боковых поверхностях отверстий-концентраторов замедляют зарождение критических трещин, что согласуется с данными [2, 3].

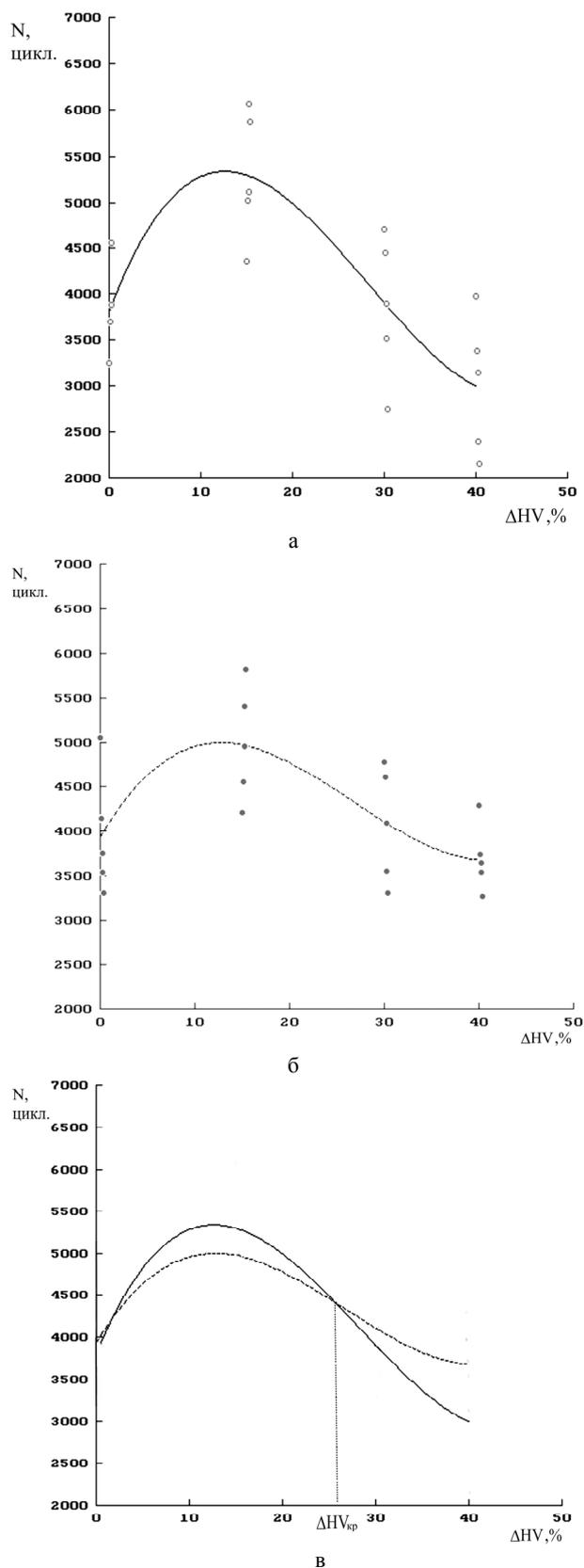


Рис. 4. Зависимость повторно-статической долговечности N образцов сплава ОТ4 от перепада микротвёрдости ΔHV при выполнении отверстий-концентраторов: а – до отжига; б – после отжига перед испытаниями; в – сравнительный ход кривых для вариантов до отжига (сплошная линия) и после отжига (пунктир)

При $\Delta HV > 25\%$ вариант с отверстиями после отжига становится предпочтительным. Например, при $\Delta HV = 40\%$ долговечность по данному варианту выше на $\sim 25\%$. Это связано с исключением охрупчивающего действия газонасыщенного слоя на боковых поверхностях отверстия-концентратора.

Выводы

1. Выполнение надрезов-концентраторов после отжига в диапазоне температур 350 – 550 °С повышает работу образования трещины и в целом показатель КСУ в сравнении с вариантом выполнения надреза до отжига, что можно объяснить удалением оксидов с боковых поверхностей надрезов. Данный эффект характерен для титановых сплавов как высокой, так и низкой прочности.

2. При наличии газонасыщенных слоёв с небольшими перепадами микротвёрдости

$\Delta HV \sim 15\%$ более высокую повторно-статическую выносливость листов из титанового сплава ОТ4 обеспечивает вариант с выполнением отверстий-концентраторов до отжига в сравнении с вариантом отверстий после отжига, что связано с замедлением зарождения усталостных трещин.

Литература

1. Технология производства титановых самолётных конструкций / А.Г. Братухин, Б.А. Колачёв, В.В. Садков и др. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
2. Коломенский А.Б., Шахов С.В., Коломенский Б.А. Сравнительное влияние различных газонасыщенных слоёв на механические характеристики листов из титановых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 6. С. 30-36.
3. Повышение ресурсных характеристик технического титана путем оптимизации параметров газонасыщенных слоёв / А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский, И.В. Зубарев // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018. Т. 14. № 3. С. 135-140.

Поступила 22.05.2025; принята к публикации 07.07.2025

Информация об авторах

Коломенский Александр Борисович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kolomenskii_alek@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0766-6830>

Шахов Сергей Викторович – канд. техн. наук, главный металлург, Филиал ПАО «Ил» - ВАСО (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: shsv@vaso.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8333-1000>

Коломенский Борис Александрович – канд. техн. наук, начальник службы рекламаций, Филиал ПАО «Ил» - ВАСО (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: KolomenskiiBA@vaso.ru

Емельянов Игорь Иванович – инженер, Филиал ПАО «Ил» - ВАСО (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: jemper579@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0179-022X>

ON THE EFFECT OF THE ORDER OF CONCENTRATOR EXECUTION ON THE RESISTANCE TO DYNAMIC LOADS OF TITANIUM SHEET ALLOYS WITH AN OXIDIZED SURFACE

A.B. Kolomenskiy¹, S.V. Shakhov², B.A. Kolomenskiy², I.I. Emel'yanov²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Branch of JSC "IL" - VASO, Voronezh, Russia

Abstract: in the process of the technological manufacturing from titanium alloys, during heating, interference-colored oxide films are formed, and at temperatures above 550° C, oxygen diffusion into metal begins with the formation of gas-saturated layers, which potentially affects the operational characteristics of parts, especially during dynamic loads. Real designs almost always have geometric concentrators - holes, radius, etc., which, in conjunction with surface oxidation and gas saturation, can have a significant impact on the operational durability of products. The question of the impact of the sequence of the implementation of concentrators on the resistance of titanium sheet parts with dynamic loads is not illuminated enough. In this work, we investigated the impact of the sequence of concentrators on the indicators of cyclic durability and shock viscosity of sheet titanium alloys with an oxidized surface formed during annealing process. We revealed that the execution of concentrators after annealing at temperatures up to 550° C gives large values of the shock viscosity of the titanium sheets than when performing concentrators to annealing. This is due to the removal of oxides from the side surfaces of the cuts, which increases the work of the cracking. For a higher annealing temperature, at which the process of forming a lawn-saturated layer begins, the advantage has an option with a preliminary application of a concentrator

Key words: titanium alloys, annealing, oxide films, impact strength, cyclic durability

References

1. Bratukhin A.G., Kolachev B.A., Sadkov V.V. et al. "Production technology of titanium aircraft structures" ("Tekhnologiya proizvodstva titanovykh samolotnykh konstruktsii"), Moscow: Mashinostroenie, 1995, 448 p.
2. Kolomenskiy A.B., Shakhov S.V., Kolomenskiy B.A. "Comparative influence of various gas-saturated layers on the mechanical characteristics of titanium alloy sheets", *Metal Science and Heat Treatment (Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov)*, 2016, no. 6, pp. 30-36.
3. Kolomenskiy A.B., Shakhov S.V., Kolomenskiy B.A., Zubarev I.V. "Improving the resource characteristics of technical titanium by optimizing the parameters of gas-saturated layers", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, vol. 14, no. 3. 2018, pp. 135-140.

Submitted 22.05.2025; revised 07.07.2025

Information about the authors

Aleksandr B. Kolomenskiy, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, 394006, Voronezh, Russia), e-mail: kolomenskii_alek@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0766-6830>
Sergey V. Shakhov, Cand. Sci. (Technical), Chief Metallurgist, Branch JSC "IL" – VASO (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: shsv@vaso.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8333-1000>
Boris A. Kolomenskiy, Cand. Sci. (Technical), Head of the complaints service, Branch JSC "IL" - VASO, (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: KolomenskiiBA@vaso.ru, ORCID: <https://orcid.org/>
Igor' I. Emel'yanov, engineer, Branch JSC "IL" - VASO, (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: jemper579@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0179-022X>

Правила для авторов

1. Принимаются к рассмотрению оригинальные научные статьи на русском языке общим объемом от 4 до 10 страниц. Материал статьи следует представить в электронном виде в формате word и pdf.

2. Текст статьи предоставляется в формате А 4. Поля страницы: верхнее – 2,5 см; нижнее - 2 см; правое - 2 см; левое - 2 см.

Шрифт текста - Times New Roman, межстрочный интервал 1,0. Размер шрифта основного текста 11. Аннотация, ключевые слова, благодарности, подрисуночные надписи, информация об авторах – 9 шрифт. Допускается в формулах, таблицах и рисунках уменьшить размер шрифта до 9.

3. Абзацный отступ - 0,8 см. Аннотация, ключевые слова и благодарности должны располагаться с дополнительным отступом 0,8 см от левого края.

4. На первой странице текста необходимо указать УДК (в левом верхнем углу листа от поля); название статьи (8-10 слов без каких-либо сокращений и аббревиатур, заглавными буквами), инициалы и фамилию автора(ов); полное наименование места работы автора(ов) с указанием города и страны; далее следуют аннотация, ключевые слова (от 5 до 10), а также благодарности (если есть).

5. Аннотация (реферат) к статье должна быть: информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 150 до 250 слов). Аннотация акцентирует научную новизну проведенных исследований и их результатов, отражает логику построения статьи (т.е. затрагивает основные этапы исследований). «Англоязычная» аннотация должна быть написана качественным английским языком.

6. Основной текст статьи должен быть структурирован по принципу выделения значимых его элементов (введение, постановка задачи, методы исследования, результаты, выводы или заключение и т.п.). Основной текст и литературу представляют на листе в две колонки шириной по 8 см каждая (межколоночное расстояние 1 см).

7. Таблицы располагаются по тексту. Над названием таблицы справа пишут «Таблица 1». Ссылка

на таблицу в тексте оформляется следующим образом: «табл. 1».

8. Оформление рисунков в формате BMP. Подрисуночные подписи не входят в состав рисунков, а располагаются отдельным текстом. Рекомендуемая ширина рисунков - не более ширины колонки. При необходимости допускается ширина рисунка равная двум колонкам. Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы. Перед названием рисунка пишут «Рис. 1». Ссылку на рисунок оформляют следующим образом: «рис. 1».

9. Формулы нумеруют в круглых скобках (2), подстрочные примечания - арабскими цифрами.

10. Используемые в работе термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми. Все употребляемые авторами обозначения (за исключением общеизвестных констант типа e, h, c и т.п.) и аббревиатуры должны быть определены при их первом упоминании в тексте.

11. Все литературные ссылки в материале должны быть указаны в квадратных скобках - [1]. В тексте статьи должны присутствовать ссылки на все используемые литературные источники по мере их упоминания. Литература оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка. Желательно, чтобы в литературе самоцитирование не превышало 30%.

12. После литературы необходимо расположить информацию о каждом авторе, включающую расшифровку имени и отчества, обозначение ученой степени, звания и должности, полное наименование места работы, полный адрес организации, контактные данные (e-mail, номер телефона), а также ссылку на профиль автора в ORCID.

13. Далее следует англоязычный информационный блок, где содержится перевод заглавия, ФИО авторов, полного наименования мест работы авторов, аннотации, ключевых слов, благодарностей, литературы и информации об авторах.

14. Вместе со статьей в редакцию предоставляют заполненный лицензионный договор на право использования научной статьи и разрешение на публикацию (письмо и экспертное заключение о возможности открытого опубликования), которое должно быть заверено печатью и подписью ответственного лица.

Материалы представляются по адресу:

394026, Воронежская обл., г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, к. 211.
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Редакция журнала «Вестник Воронежского государственного технического университета»
Тел.: +7(473)278-38-89; e-mail: vestnik@vorstu.ru

Дата выхода в свет: 25.09.2025.
Формат 60x84/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 20,9. Уч.-изд. л. 18,7.
Тираж 25 экз. Заказ № 220.
Цена свободная

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84